



# Contribution à la commande corps-complet des robots humanoïdes : du concept à l'implémentation temps-réel

David Galdeano

## ► To cite this version:

David Galdeano. Contribution à la commande corps-complet des robots humanoïdes : du concept à l'implémentation temps-réel. Automatique / Robotique. Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, 2014. Français. NNT : 2014MON20070 . tel-01374617

**HAL Id: tel-01374617**

**<https://theses.hal.science/tel-01374617>**

Submitted on 30 Sep 2016

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# THÈSE

Pour obtenir le grade de  
**Docteur**

Délivré par :  
**Université Montpellier II**  
**Sciences et Techniques du Languedoc**

Préparée au sein de l'école doctorale : **I2S\***

Et de l'unité de recherche :  
**Laboratoire d'Informatique, de Robotique  
et de Microélectronique de Montpellier**

Spécialité:  
**Systèmes Automatiques et Microélectroniques**

Présentée par **David Galdeano**  
Galdeano@lirmm.fr  
*Version mise à jour le 11 février 2015 à 08:59*

**Contribution à la commande  
corps-complet des robots humanoïdes:  
Du concept à l'implémentation temps-réel**

Soutenue le 13/11/2014 devant le jury composé de :

M. Fethi BEN OUEZDOU	Professeur	LISV	Président
M. Nacer M'SIRDI	Professeur	LSIS	Rapporteur
M. Yannick Aoustin	Maître de conférence HDR	IRCCYN	Rapporteur
M. Philippe FRAISSE	Professeur	LIRMM	Directeur de thèse
M. Ahmed CHEMORI	Chargé de Recherche	LIRMM	Co-Encadrant de thèse
M. Sébastien KRUT	Chargé de Recherche	LIRMM	Co-Encadrant de thèse



## Abstract

Humanoid robots are a rising trend, and are about to be sold to the public on a large scale, but for this to be possible it is necessary to make them reliable, secure and functional. This implies many improvements over the prior state of the art. A domain of improvement is the full-body control of humanoid robots. The objective of this thesis is to propose a control architecture for generating a bio-inspired full-body control. The main idea is to learn from human walking to replicate these movements on a humanoid robot. The proposed control solution uses the principle of kinematics task for four objectives: (i) the relative pose of the feet, (ii) the position of the Centre de masse (CoM), (iii) the orientation of the upper-body, and (iv) the joints' limits avoidance. Stability is enhanced by modifying the CoM position by using a stabilizer based on nonlinear regulation of the Zero Moment Point (ZMP). The resulting approach is called hybrid kinematic / dynamic control architecture. This approach has been validated experimentally on two prototypes of humanoid robots for tasks such as squat and walking.

**Keywords:** *whole-body control, humanoid robots, bio-inspired walking*

---

## Résumé

Les robots humanoïdes sont en passe d'être commercialisés pour le public à grande échelle, mais pour réussir cet objectif il est nécessaire des rendre ces robots fiables, fonctionnels et sécurisés. Ceci implique de nombreuses améliorations par rapport à l'état de l'art, pour permettre un produit fini. Un des domaines à améliorer est la commande corps-complet des robots humanoïdes. Les objectifs de cette thèse sont de proposer une architecture de commande permettant de générer des mouvements corps-complet bio-inspirés. L'idée principale étant de s'inspirer de la marche humaine afin de reproduire ces mouvements sur un robot humanoïde. La solution de commande proposée utilise le principe de tâches pour quatre objectifs cinématiques: (i) la pose relative des pieds, (ii) la position du CoM, (iii) l'orientation du buste, et (iv) l'évitement des butées articulaires. La stabilité est renforcée en modifiant la position du CoM désirée à l'aide d'un stabilisateur basé sur la régulation non linéaire du ZMP. L'approche résultante est appelée architecture de commande hybride cinématique/dynamique. Cette approche a été validée expérimentalement sur deux prototypes de robots humanoïdes pour différentes tâches telles que le squat et la marche.

**Mots clefs :** *controle corps-complet, robots humanoïdes, marche bio-inspirée*





---

## Remerciements

Je voudrais tout d'abord remercier mon directeur de thèse, Philippe Fraisse, pour toute son aide. Je suis ravi d'avoir travaillé en sa compagnie, car outre son appui scientifique, il a été là pour proposer de nouvelles pistes et me conseiller au cours de l'élaboration de cette thèse.

Je remercie ensuite mon co-encadrant Sébastien Krut qui m'a rassuré pour mes présentations et dont les conseils pour la partie mécanique ont toujours été utiles, je ne compte plus les mises en pièces et remontage du robot Sherpa.

Cette thèse n'aurais jamais vu le jour sans la présence de mon co-encadrant Ahmed Chemori. Merci pour tes idées, les échanges qu'on a eus, la rigueur que tu m'as apprise à insuffler à mon travail. Je ne compte plus les longues relectures de mes publications ; tu étais présent jour et nuit, tous les jours de la semaine, week-end compris quand les dates buttoir approchait. Ton encadrement régulier a permis à ce projet de devenir une thèse et c'est à toi que je dois le passage du "concept à l'implémentation temps-réel" cité dans le titre de cette thèse. Je te souhaite beaucoup de réussite dans tes futures recherches.

Je remercie également Pr. Nacer M'Sirdi pour avoir accepté d'être président du jury et Pr. Fethi Ben Ouezdou et M. Yannick Aoustin pour avoir accepté d'être rapporteurs de ce travail. Ils ont également contribué par leurs remarques et suggestions à améliorer la qualité de ce mémoire. Je leur en suis reconnaissant.

En ce qui concerne la partie implémentation temps-réel de ce travail, je remercie M. Michel Benoit, aujourd'hui à la retraite, pour ses suggestions en matière d'optimisation de code et la confiance qu'il m'a accordée. J'espère que tu profites de ce repos bien mérité.

Mon travail de recherche sur le mouvement humain a été possible grâce au Laboratoire LABLAB (Laboratory of Locomotor Apparatus Bioengineering, Department of Human Movement and Sports Sciences, University of Rome "Foro Italico") et je tiens à exprimer tout particulièrement ma reconnaissance au Pr. Aurelio Cappozzo, Directeur du LABLAB, qui m'a permis d'y effectuer les mesures nécessaires et au Dr. Vincent Bonnet qui m'a accueilli, fournis des volontaires et aidé dans toute la partie technique de cette étude du mouvement.

Je souhaite également exprimer toute ma gratitude à l'ensemble du personnel du LIRMM.

Une dédicace spéciale à ceux qui ont été avec moi pendant ces années de thèse, eux aussi jeunes chercheurs: Nicolas Carlési, Divine Maalouf, Johann Lamaury, Arnaud Meline, Florent Veye, Alejandro Gonzalez De Alba, Joris Vaillant, Benjamin Chretien, Romain Endelin, Joven Agravante, François Keith, Helene Leroux, Marion Vincent, Thomas Guiho, Guillaume Coppey, Guillaume Magro, Andrea Collo, Fabien Despinoy, Moussab Bennehar.

Merci également à mes amis qui m'ont permis de m'évader de la thèse quand c'était nécessaire: Lydie Cyprien, Cyril & Anna Courré, Audrey & Jérémy Baumann, Anabelle Combier, Marion Combier, Clément Moulin, Pierre-Yves & Emeline Collart Dutilleul, Robby & Anne Wisnewski, Olivier & Natacha Richez.

Heureusement que mes parents, mes soeurs, mon frère et plus généralement la famille, étaient là également pour me changer les idées. Ils ont tous cru en moi, alors merci à vous tous.

Je dédie ce manuscrit de thèse à ma femme, Aurélie, sans qui je n'aurais eu ni la volonté, ni le courage d'aller jusqu'au bout de mes capacités. Tu m'as épaulé pour que cette thèse ne soit jamais une épreuve. Merci d'être à mes côtés jour après jour.



---

# Table des matières

<b>Résumé</b>	<b>i</b>
<b>Remerciements</b>	<b>iii</b>
<b>Table des matières</b>	<b>v</b>
<b>Table des figures</b>	<b>ix</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>xv</b>
<b>Notations</b>	<b>xvii</b>
<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
Problématique de la commande corps-complet . . . . .	1
Objectifs . . . . .	2
Principales contributions . . . . .	2
Publications et communications de l’auteur . . . . .	3
Organisation du manuscrit . . . . .	5
<b>1 Introduction à la robotique humanoïde</b>	<b>7</b>
1.1 Introduction . . . . .	7
1.2 Historique de la robotique humanoïde . . . . .	8
1.3 Les principales problématiques liées à la robotique humanoïde . . . . .	10
1.4 De la marche humaine à la marche humanoïde . . . . .	12
1.4.1 La marche humaine . . . . .	12
1.4.1.1 Plans anatomiques . . . . .	12



1.4.1.2	Décomposition du cycle de marche chez l'humain . . . . .	13
1.4.1.3	Cinématique de la marche . . . . .	14
1.4.1.4	Bilan énergétique . . . . .	15
1.4.2	La marche humanoïde . . . . .	15
1.4.2.1	Décomposition du cycle de marche chez l'humanoïde . . . . .	15
1.4.2.2	Principaux indicateurs de stabilité . . . . .	17
1.4.2.3	Les modes de marche humanoïde . . . . .	19
1.4.2.4	Concepts géométriques en robotique . . . . .	20
1.5	État de l'art sur la commande corps-complet des robots humanoïdes . . . . .	23
1.5.1	Aperçu et classification des approches existantes . . . . .	24
1.5.2	Classe 1 : Approches basées sur l'optimisation . . . . .	24
1.5.3	Classe 2 : Approches basées sur la capture du mouvement humain . . . . .	25
1.5.4	Classe 3 : Approches basées sur le formalisme de tâches . . . . .	26
1.5.5	Approche hybride 1 - 2 : Optimisation - Mouvement humain . . . . .	26
1.5.6	Approche hybride 2 - 3 : Mouvement humain - Tâches . . . . .	27
1.5.7	Approche hybride 1 - 3 : Optimisation - Tâches . . . . .	27
1.6	Conclusion . . . . .	27
<b>2</b>	<b>Étude de la marche humaine</b>	<b>29</b>
2.1	Introduction . . . . .	29
2.2	Scénarios proposés pour l'étude de la marche . . . . .	30
2.2.1	Influence des mouvements des bras . . . . .	30
2.2.2	Influence de l'amplitude du CoM . . . . .	31
2.3	Capture du mouvement : Du concept à l'expérimentation . . . . .	32
2.3.1	Le LABLAB : Un laboratoire d'analyse du mouvement . . . . .	32
2.3.2	Présentation de la plate-forme expérimentale . . . . .	33
2.3.2.1	Le système de capture de mouvement Vicon . . . . .	33
2.3.2.2	Les plate-formes de mesure de forces . . . . .	37
2.3.2.3	Le logiciel LifeMOD . . . . .	38
2.3.3	Les sujets de l'étude . . . . .	39
2.3.4	Résultats des expérimentations . . . . .	41
2.4	Données minimales pour la reproduction du mouvement . . . . .	43
2.4.1	Objectif 1 : Pose relative des pieds . . . . .	44
2.4.2	Objectif 2 : Position du centre de masse . . . . .	45
2.4.3	Illustration des deux objectifs sur les données de l'humain . . . . .	46
2.5	Conclusion . . . . .	49
<b>3</b>	<b>Solution proposée : Architecture de commande hybride cinématique/dynamique</b>	<b>51</b>
3.1	Introduction . . . . .	51
3.2	Rappel de la commande cinématique à base de tâches . . . . .	52
3.2.1	Définition d'une tâche . . . . .	55

3.2.2	Cinématique inverse et noyau de la jacobienne . . . . .	55
3.2.3	Formalisme pour la gestion de deux tâches hiérarchique . . . . .	57
3.2.4	Formalisme pour la gestion d'un nombre arbitraire de tâches hiérar- chiques . . . . .	58
3.3	Contrôle cinématique à base de quatre objectifs . . . . .	59
3.3.1	Objectif 3 : Orientation du buste . . . . .	59
3.3.2	Objectif 4 : Éloignement des butées articulaires . . . . .	60
3.4	Nécessité d'une gestion de l'équilibre dynamique . . . . .	62
3.5	Un stabilisateur dynamique basé sur la mesure du ZMP . . . . .	63
3.5.1	Régulation du ZMP par un contrôleur PD . . . . .	64
3.5.2	Régulation du ZMP par un contrôleur PID non linéaire . . . . .	65
3.5.3	Projection sphérique de la régulation du ZMP . . . . .	68
3.6	Architecture globale de la commande hybride cinématique/dynamique . . .	71
3.7	Spécificités de l'architecture de commande proposée . . . . .	74
3.8	Conclusion . . . . .	76
<b>4</b>	<b>Modélisation et simulation du mouvement d'un robot humanoïde</b>	<b>79</b>
4.1	Introduction . . . . .	79
4.2	Présentation de la modélisation des robots . . . . .	80
4.2.1	Structure générique de données représentant les robots . . . . .	80
4.2.2	Simulation dynamique . . . . .	82
4.2.2.1	Dynamique du robot . . . . .	83
4.2.2.2	Forces de contact . . . . .	83
4.2.3	Simulateur et interface graphique . . . . .	85
4.3	Résultats de simulations . . . . .	86
4.3.1	Scénario 1 : Mouvement de squat sur un modèle humain . . . . .	86
4.3.1.1	Objectifs et mise en œuvre . . . . .	87
4.3.1.2	Résultats . . . . .	87
4.3.2	Scénario 2 : Apport du stabilisateur sur les marges de stabilité . . . .	89
4.3.2.1	Objectifs et mise en œuvre . . . . .	90
4.3.2.2	Résultats . . . . .	90
4.3.3	Scénario 3 : Marche quasi-statique sur le robot Sherpa . . . . .	93
4.3.3.1	Objectifs et mise en œuvre . . . . .	93
4.3.3.2	Résultats . . . . .	93
4.3.4	Scénario 4 : Marche dynamique sur le robot HOAP-3 . . . . .	95
4.3.4.1	Objectifs et mise en œuvre . . . . .	95
4.3.4.2	Résultats . . . . .	96
4.4	Conclusion . . . . .	97
<b>5</b>	<b>Plate-formes et validations expérimentales</b>	<b>99</b>
5.1	Introduction . . . . .	99

5.2	Description des plate-formes expérimentales . . . . .	100
5.2.1	Le robot bipède Sherpa . . . . .	100
5.2.1.1	Présentation du robot . . . . .	100
5.2.1.2	Structure cinématique . . . . .	100
5.2.1.3	Structure matérielle . . . . .	101
5.2.1.4	Architecture logicielle . . . . .	102
5.2.2	Le robot humanoïde HOAP-3 . . . . .	102
5.2.2.1	Présentation du robot . . . . .	102
5.2.2.2	Structure cinématique . . . . .	102
5.2.2.3	Structure matérielle . . . . .	103
5.2.2.4	Architecture logicielle . . . . .	104
5.3	Résultats d'expérimentations . . . . .	106
5.3.1	Scénario 1 : Mouvement de squat cyclique . . . . .	106
5.3.1.1	Objectifs et mise en œuvre . . . . .	106
5.3.1.2	Résultats . . . . .	106
5.3.2	Scénario 2 : Adaptation de la posture envers une inclinaison du sol . . . . .	111
5.3.2.1	Objectifs et mise en œuvre . . . . .	111
5.3.2.2	Résultats . . . . .	111
5.3.3	Scénario 3 : Marche sur un sol horizontal . . . . .	113
5.3.3.1	Objectifs et mise en œuvre . . . . .	114
5.3.3.2	Résultats . . . . .	114
5.3.4	Scénario 4 : Marche sur un sol irrégulier . . . . .	117
5.3.4.1	Objectifs et mise en œuvre . . . . .	118
5.3.4.2	Résultats . . . . .	118
5.3.5	Scénario 5 : Marche avec balancement des bras . . . . .	121
5.3.5.1	Objectifs et mise en œuvre . . . . .	121
5.3.5.2	Résultats . . . . .	121
5.4	Conclusion . . . . .	125
<b>Conclusion et perspectives</b>		<b>127</b>
	Conclusion . . . . .	127
	Perspectives . . . . .	129
<b>A</b>	<b>Placement des marqueurs Plug-in-gait</b>	<b>131</b>
<b>B</b>	<b>Dimensions et débattements articulaires du robot HOAP-3</b>	<b>137</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>141</b>



---

## Table des figures

0.1	La commande corps-complet permet de générer les mouvements pour des scénarios aussi divers que la montée d'échelle, la marche et le transport d'objets (ici une table). . . . .	2
1.1	La serveuse automate selon Philon de Byzance . . . . .	8
1.2	Robots humanoïdes récent de taille humaine utilisés dans la recherche en robotique . . . . .	9
1.3	Illustration graphique des plans et des axes anatomiques . . . . .	13
1.4	Décomposition d'un cycle de marche humaine [Parent, 2003] . . . . .	14
1.5	Quelques exemples de robots humanoïdes . . . . .	16
1.6	Séquence des phases dans la marche. . . . .	17
1.7	Projection du Centre de masse (CoM) par rapport au polygone de sustentation [Nuñez Nalda, 2008]. . . . .	18
1.8	Position du Zero Moment Point (ZMP) par rapport au polygone de sustentation, un mouvement brusque des bras peut faire chuter le robot [Nuñez Nalda, 2008]. . . . .	19
1.9	Marche quasi-statique bipède, vue de dessus, (■ : CoM) projeté sur le polygone de sustentation, la flèche indique le sens de déplacement du CoM. . . . .	19
1.10	Marche dynamique d'un robot bipède (■ : CoM), la flèche indique la trajectoire de la projection du CoM, les rectangles représentent le polygone de sustentation. . . . .	20
1.11	Classification de l'état de l'art de la commande corps-complet des robots humanoïdes. . . . .	24
2.1	Système de capture de mouvement Vicon® constitué de plusieurs caméras entourant l'espace de mouvement, d'un ordinateur équipé du logiciel Vicon Nexus et d'une unité d'interface entre les caméras et l'ordinateur. . . . .	34

2.2	Camera Vicon® pour la capture de mouvement. . . . .	34
2.3	Vue de la valise de calibration Vicon®, elle contient (entre autres) la baguette (en jaune) et l'équerre (en bleu). . . . .	35
2.4	Visualisation de la scène d'expérimentation à l'aide du logiciel Vicon Nexus. . .	37
2.5	Principe de fonctionnement d'une plate-forme de force. . . . .	38
2.6	Illustration du modèle géométrique utilisé pour représenter le système locomoteur de l'humain (position des ddl). . . . .	39
2.7	Importation des marqueurs dans le logiciel LifeMOD. . . . .	40
2.8	Estimation cinématique dans le logiciel LifeMOD (le mouvement est guidé par les marqueurs). . . . .	40
2.9	Estimation dynamique dans le logiciel LifeMOD (couple articulaire). . . . .	41
2.10	Principe de base de l'acquisition de données du mouvement humain. Un gabarit corps-complet composé de 35 marqueurs réfléchissants (a) a été utilisé pour suivre les déplacements de chaque membre. (b) Les marqueurs correspondants ont été appliqués sur un modèle géométrique spécifié (c) afin de permettre une estimation des positions et couples articulaires, des trajectoires des pieds ainsi que la trajectoire du centre de masse. . . . .	43
2.11	Illustration de l'erreur liée à la pose relative des pieds. . . . .	44
2.12	Illustration de l'erreur liée à la position du centre de masse. . . . .	45
2.13	Schéma-bloc de la commande pour les deux objectifs. . . . .	47
2.14	Application directe des trajectoires issues de la capture du mouvement. . . . .	47
2.15	Application des trajectoires modifiées. . . . .	48
2.16	Trajectoires articulaires de la jambe droite dans le plan sagittal. . . . .	49
2.17	Position cartésienne du pelvis, où X, Y et Z représentent respectivement les axes antéro-postérieur, transversal et longitudinal. . . . .	50
3.1	Le MGD permet de calculer les positions dans l'espace opérationnel $[X_1, X_2]^T$ à partir des positions dans l'espace articulaire $[q_1, q_2]^T$ . . . . .	52
3.2	Le MGI permet de passer de l'espace opérationnel $[X_1, X_2]^T$ à l'espace articulaire $[q_1, q_2]^T$ . . . . .	53
3.3	Illustration d'une posture parmi l'infinité possible respectant les deux premiers objectifs, la configuration articulaire contient des singularités au niveau des bras. . . . .	60
3.4	La position de confort est définie comme la pose où les positions articulaires sont le plus loin possible de leurs limites. . . . .	61
3.5	Contrôle cinématique basé sur la hiérarchie d'objectifs. . . . .	62
3.6	Illustration graphique des erreurs de suivi de la position du ZMP. . . . .	65
3.7	Évolution typique du gain proportionnel non linéaire en fonction de l'erreur du ZMP (normalisée par rapport à $\delta_1$ ). Le gain est saturé à $k_p$ quand la norme de l'erreur est en dessous de $\delta_1$ , sinon le gain décroît. . . . .	67

3.8	Évolution typique du gain dérivé non linéaire en fonction de la dérivée de l'erreur du ZMP (normalisée par rapport à $\delta_2$ ). Le gain est saturé à $k_d$ quand la norme de la dérivée de l'erreur est en dessous de $\delta_2$ , sinon le gain augmente. . .	67
3.9	Illustration de la problématique liée à la projection planaire de la régulation du ZMP, la position du CoM désirée peut être trop étirée. La longueur des jambes au repos est $h_{\text{repos}}$ , la longueur des jambes étirées est $h_{\text{etire}} = \sqrt{h_{\text{repos}}^2 + d_{\text{etire}}^2}$ . Si $d_{\text{etire}}$ est grand, les jambes se retrouvent en position singulière. . . . .	68
3.10	Espace de la projection sphérique en fonction de la norme de $u_{\text{ZMP}}$ ( $\beta = 1$ et $\gamma = 1$ ). Les empreintes de pied sont affichées en gris. . . . .	69
3.11	Espace de la projection sphérique en fonction de la norme de $u_{\text{ZMP}}$ ( $\beta = 0.5$ et $\gamma = 0.75$ ). Les empreintes de pied sont affichées en gris. . . . .	70
3.12	Vue frontale de la projection sphérique avec $u_{\text{ZMPX}} = 0$ et $u_{\text{ZMPX}}$ variant dans le domaine $\left[-h_{\text{CoM}} \frac{\pi}{2}; h_{\text{CoM}} \frac{\pi}{2}\right]$ . La structure du robot est affichée en gris. Les paramètres d'ajustement de la projection sphérique sont à $\beta = 1$ et $\gamma = 1$ pour le trait continu bleu et $\beta = 0.5$ et $\gamma = 0.75$ pour le trait discontinu vert. . . . .	70
3.13	Vue frontale du mouvement induit par la régulation du ZMP pour un changement de poids du bras. On observe la projection sphérique de la régulation du ZMP avec la compensation de l'orientation du buste. . . . .	71
3.14	Architecture globale de la commande proposée avec la hiérarchie d'objectifs. NLPID et SP sont respectivement les acronymes de PID non linéaire et de projection sphérique. . . . .	72
3.15	Schéma bloc de l'architecture globale de la commande proposée avec la hiérarchie d'objectifs. NLPID et SP sont respectivement les acronymes de PID non linéaire et de projection sphérique. . . . .	75
4.1	Représentation du modèle simplifié de la cinématique de l'humain présenté dans la section 2.3.2.3 sous la forme d'un arbre binaire. Le modèle dispose de 22 degrés de liberté (ddl) et la représentation est donc composée d'une base flottante et de 22 segments. Chaque nœud de l'arborescence est relié aux autres par une branche parent, sœur ou enfant. La représentation graphique de ce modèle est illustrée sur la Figure 4.4 . . . . .	81
4.2	Illustration du modèle de contact pied/sol par pénalité. . . . .	84
4.3	La multiplication des points de contact permet un calcul précis du centre de pression dans le polygone de sustentation quand le pied n'est pas parfaitement à plat. . . . .	85
4.4	Vue de l'interface graphique du simulateur développé. . . . .	85
4.5	Illustration du mouvement de squat. . . . .	87
4.6	Séquence illustrant le mouvement de squat appliqué sur le modèle humain pour le scénario 1. . . . .	88

4.7	Évolution des trajectoires articulaires du côté droit du corps (jambe droite, torse, bras droit et cou) pour le scénario 1. . . . .	88
4.8	Tracé de la trajectoire du genou droit en fonction du tangage de la hanche droite pour le scénario 1. . . . .	89
4.9	Évolution des positions du CoM et du ZMP pour le scénario 1. . . . .	90
4.10	Illustration de la chute du robot suite à l'augmentation de l'amplitude des oscillations pour le scénario 2. . . . .	91
4.11	Représentation graphique de l'amplitude des oscillations du CoM selon l'axe antéro-postérieur pour le scénario 2. . . . .	91
4.12	Évolution des trajectoires des positions du CoM pour le scénario 2. . . . .	92
4.13	Évolution des positions du CoM et du ZMP pour le scénario 2. . . . .	92
4.14	Illustration du robot Sherpa pendant une marche quasi-statique pour le scénario 3. . . . .	93
4.15	Évolution des trajectoires articulaires pour le scénario 3. . . . .	94
4.16	Évolution de la position du CoM pour le scénario 3. . . . .	94
4.17	Évolution des positions du CoM et du ZMP pour le scénario 3. . . . .	95
4.18	Vue du robot HOAP-3 pendant une marche dynamique en simulation cinétique pour le scénario 4. . . . .	96
4.19	Évolution des trajectoires articulaires du côté droit pour le scénario 4. . . . .	96
5.1	Le robot bipède Sherpa est notre premier démonstrateur pour les expérimentations temps-réel. . . . .	101
5.2	Vue de l'interface de développement Visual C++ 6.0 utilisée pour le bipède Sherpa. . . . .	103
5.3	Vue du robot humanoïde HOAP-3, notre second démonstrateur. . . . .	104
5.4	Structure cinématique du robot humanoïde HOAP-3. . . . .	105
5.5	La trajectoire de référence du CoM est une sinusoïde sur l'axe vertical pour le scénario 1. Ceci génère un mouvement de squat sur les robots. . . . .	107
5.6	Mouvements de squat appliqués sur le robot Sherpa pour le scénario 1. . . . .	107
5.7	Évolution des trajectoires articulaires pour le scénario 1. . . . .	108
5.8	Illustration du mouvement produit pour le scénario 1. Le mouvement de squat est le résultat de l'application, sur le robot HOAP-3, d'une sinusoïde sur l'axe vertical de la trajectoire désirée du CoM. . . . .	109
5.9	Évolution des trajectoires articulaires pour le scénario 1. . . . .	110
5.10	Tracé de la trajectoire du genou droit en fonction du tangage de la hanche droite pour le scénario 1. . . . .	110
5.11	Adaptation de la posture du robot aux variations de l'inclinaison du sol en temps-réel pour le scénario 2. . . . .	111
5.12	Évolution des trajectoires articulaires du côté droit du robot HOAP-3 (jambe droite, torse, bras droit et cou) pour le scénario 2. . . . .	112
5.13	Évolution de la position du CoM dans le référentiel du pied droit pour le scénario 2. . . . .	113

5.14	Évolution de la position du pied gauche dans le référentiel du pied droit pour le scénario 2. . . . .	113
5.15	Évolution des positions du CoM et du ZMP pour le scénario 2. . . . .	114
5.16	Marche du robot HOAP-3 sur sol horizontal pour le scénario 3. . . . .	115
5.17	Évolution des trajectoires articulaires du côté droit du robot HOAP-3 (jambe droite, torse, bras droit et cou) pour le scénario 3. . . . .	115
5.18	Évolution de la position du CoM dans le référentiel du pied droit pour le scénario 3. . . . .	116
5.19	Évolution de la position du pied gauche dans le référentiel du pied droit pour le scénario 3. . . . .	117
5.20	Évolution des positions du CoM et du ZMP pour le scénario 3. . . . .	117
5.21	Marche sur un sol irrégulier (scénario 4). . . . .	118
5.22	Évolution des trajectoires articulaires du côté droit du robot HOAP-3 (jambe droite, torse, bras droit et cou) pour le scénario 4. . . . .	119
5.23	Évolution de la position du CoM dans le référentiel du pied droit pour le scénario 4. . . . .	120
5.24	Évolution de la position du pied gauche dans le référentiel du pied droit pour le scénario 4. . . . .	120
5.25	Évolution des positions du CoM et du ZMP pour le scénario 4. . . . .	121
5.26	Marche du robot HOAP-3 sur sol horizontal avec balancement des bras pour le scénario 5. . . . .	122
5.27	Évolution des trajectoires articulaires du côté droit du robot HOAP-3 (jambe droite, torse, bras droit et cou) pour le scénario 5. . . . .	122
5.28	Évolution de la position du CoM dans le référentiel du pied droit pour le scénario 5. . . . .	123
5.29	Évolution de la position du pied gauche dans le référentiel du pied droit pour le scénario 5. . . . .	124
5.30	Évolution des positions du CoM et du ZMP pour le scénario 5. . . . .	124
A.1	Placement des 35 marqueurs réflectifs du gabarit corps-complet Plug-in-gait. . . . .	132
B.1	Dimensions du robot HOAP-3. (Source : HOAP-3 INSTRUCTION MANUAL, Fujitsu Automation Limited) . . . . .	138







---

## Liste des tableaux

2.1	Scénarios proposés pour l'étude de l'influence de l'amplitude du CoM sur la dépende énergétique pendant la marche humaine . . . . .	31
2.2	Les données anthropomorphiques des sujets de l'étude . . . . .	42
3.1	Solutions proposées pour le stabilisateur dynamique. . . . .	64
A.1	Liste des marqueurs du gabarit corps-complet Plug-in-gait. . . . .	133
B.1	Liste des longueurs des segments du HOAP-3 correspondant à la figure B.1. . . .	139
B.2	Débattements articulaires du HOAP-3. . . . .	140



# Notations

Présentation des notations utilisés dans cette thèse.

Symbole	Signification
$A^T$	Transposée de la matrice $A$ .
$J(\tau)$	Jacobienne de la tâche $\tau$ .
$J_{CoM}$	Matrice jacobienne de la position du CoM.
$J_{ori}$	Matrice jacobienne de l'orientation du buste.
$J_r$	Matrice jacobienne de la pose relative des pieds.
$\mathbb{I}$	Matrice identité.
$\mathcal{T}$	Tâche.
$\varepsilon_{CZ}$	Erreur de position du CoM avec régulation du ZMP.
$\varepsilon_{CoM}$	Erreur de position du CoM.
$\varepsilon_{Joints}$	éloignement des butées articulaires.
$\varepsilon_e$	Erreur de positionnement dans l'espace articulaire.
$\varepsilon_{ori\_sp}$	Erreur d'orientation du buste avec régulation du ZMP.
$\varepsilon_{ori}$	Erreur d'orientation du buste.
$\varepsilon_q$	Erreur de positionnement dans l'espace opérationnel.
$\varepsilon_r$	Erreur de la pose relative des pieds.

*Continue sur la page suivante*

Tableau 1 – *Suite de la page précédente*

Symbole	Signification
$\ddot{q}$	Accélérations articulaires.
$\dot{q}$	Vitesses articulaires.
$\dot{X}$	Vitesses dans l'espace opérationnel.
$\tau$	Couples articulaires.
$q$	Variables articulaires.
$X$	Position cartésienne.
<b>3DLIPM</b>	Modèle de pendule inversé linéaire 3D.
<b>CoM</b>	Centre de masse.
<b>ddl</b>	Degré de liberté.
<b>FRI</b>	Foot Rotation Indicator.
<b>MCD</b>	Modèle Cinématique Direct.
<b>MCI</b>	Modèle Cinématique Inverse.
<b>MDD</b>	Modèle Dynamique Direct.
<b>MDI</b>	Modèle Dynamique Inverse.
<b>MGD</b>	Modèle Géométrique Direct.
<b>MGI</b>	Modèle Géométrique Inverse.
<b>n</b>	Nombre de degrés de liberté du robot.
<b>PD</b>	Proportionnel Dérivé.
<b>PID</b>	Proportionnel Intégral Dérivé.
<b>x,y,z</b>	Axes de translation dans l'espace cartésien.
<b>ZMP</b>	Zero Moment Point.



---

# Introduction générale

## Problématique de la commande corps-complet

Les robots humanoïdes sont en passe d'être commercialisés pour le public à grande échelle, mais pour réussir cet objectif il est nécessaire de rendre ces robots fiables, fonctionnels et sécurisés. Ceci implique de nombreuses améliorations de l'état de l'art, pour permettre un produit fini. Un des domaines à améliorer est la commande corps-complet des robots humanoïdes.

La commande corps-complet correspond à un algorithme de contrôle du robot afin de générer des mouvements en utilisant la totalité du corps du robot. Si cette définition apparaît comme une évidence, l'application sur des robots est complexe à mettre en œuvre. En effet, sur un robot humanoïde, il est nécessaire pour la commande de gérer des cas aussi différents que le balancement, la marche, ou la manipulation d'objets. Parfois même plusieurs de ces comportements en même temps. Pour cela, il faut prendre en compte les différents contacts ou points d'appuis, la dynamique du robot, la redondance d'actionnement et la stabilité du robot. Pour interagir avec l'environnement, il est nécessaire de le comprendre à l'aide des capteurs embarqués sur le robot et de réagir aux informations reçues en permettant au robot de se mouvoir à l'aide des actionneurs.

A l'aide de la commande corps-complet, il est possible de générer des solutions à des problèmes de déplacement, manipulation d'objet ou interaction homme / robot comme illustrés sur la Figure 0.1. La commande corps-complet permet au robot d'accomplir des tâches utiles, permettant de passer du robot ludique au robot d'assistance.

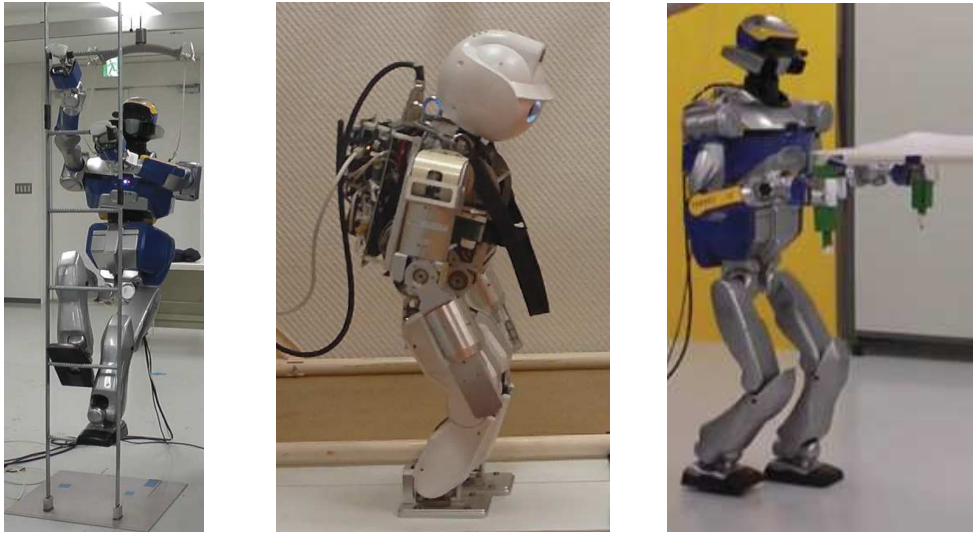


Figure 0.1: La commande corps-complet permet de générer les mouvements pour des scénarios aussi divers que la montée d'échelle, la marche et le transport d'objets (ici une table).

## Objectifs

Les objectifs de cette thèse sont de proposer une architecture de commande permettant de générer des mouvements corps-complet bio-inspirés. L'idée principale étant de s'inspirer de la marche humaine afin de reproduire ces mouvements. Pour cela, il est nécessaire d'étudier le mouvement humain pour en comprendre les caractéristiques principales. Ces caractéristiques pourront être adaptées sur le robot humanoïde pour générer un mouvement d'apparence humaine.

## Principales contributions

Lors de cette thèse, de multiples contributions ont été apportées. Celle-ci sont principalement liées à la commande corps-complet des robots humanoïdes.

La première contribution a été une étude pratique de la marche humaine, réalisée en collaboration avec le laboratoire d'étude de la biomécanique LABLAB situé à Rome en Italie. Cette étude a été réalisée selon deux axes d'expérimentations :

- l'analyse de l'influence des mouvements des bras sur la dépense énergétique pendant la marche ;
- l'analyse de l'influence de l'amplitude de déplacement du Centre de masse (CoM) sur le coût mécanique de la marche.

Cette étude a permis de mettre en avant les données minimales pour la reproduction de la marche :

- la pose relative des pieds ;
- la position du centre de masse.

La seconde contribution consiste en une proposition de commande corps-complet. Les données minimales ont été utilisées pour créer une architecture de commande hybride cinématique/dynamique basée sur quatre objectifs. Les deux premiers objectifs correspondent au suivi de la trajectoire des données minimales et les deux objectifs restants sont :

- l'orientation du buste ;
- l'éloignement des butées articulaires.

Cette architecture de commande a été renforcée par la création d'un stabilisateur non linéaire basé sur la régulation du ZMP.

La troisième contribution est la création d'un simulateur dynamique multi-contact pour robot humanoïde, qui permet de valider les choix de lois de commande.

Des expérimentations en temps-réel sur deux robots, le SHERPA et le HOAP ont été réalisées afin de démontrer l'efficacité des solutions proposées. Ces travaux ont été supportés par les projets ANR SHERPA (ANR-06-BLAN-0244-01) et R2A2 (ANR-09-SEGI-011).

## Publications et communications de l'auteur

Les travaux de l'auteur ont donné lieu aux communications suivantes :

### JOURNAUX INTERNATIONAUX :

1. **D. Galdeano**, A.Chemori, S. Krut and P. Fraise, "*Optimal Pattern Generator For Dynamic Walking in Humanoid Robotics*", Transactions on Systems, Signals & Devices, accepté, 2014.

### CONFÉRENCE INTERNATIONALES :

1. **D. Galdeano**, A. Chemori, S. Krut and P. Fraise, "*A Nonlinear PID Stabilizer With Spherical Projection for Humanoids : From Concept to Real-time Experiments*", IEEE-RAS Humanoids 2014 - Humanoids'14, Madrid, Spain, 2014.
2. **D. Galdeano**, A. Chemori, S. Krut and P. Fraise, "*Task-based whole body control of humanoid robots with ZMP regulation, real-time application to a squat-like motion*",



Multi-Conference on Systems, Signals and Devices - IEEE SSD'14, Barcelona, Spain, 2014.

3. **D. Galdeano**, A. Chemori, S. Krut and P. Fraisse, "*Optimal Pattern Generator For Dynamic Walking in Humanoid Robotics*", Multi-Conference on Systems, Signals and Devices - IEEE SSD'13, Hammamet, Tunisia, 2013.
4. **D. Galdeano**, V. Bonnet, M. Bennehar, P. Fraisse and A. Chemori, "*Partial Human Data in Design of Human-Like Walking control in Humanoid Robotics*" International IFAC Symposium on Robot Control - IFAC SYROCO'12, Dubrovnik, Croatia, 2012.

#### WORKSHOP INTERNATIONAUX :

1. **D. Galdeano**, A. Chemori, S. Krut and P. Fraisse, *Human based hybrid kinematic/dynamic whole-body control in humanoid robotics*, Workshop on Humanoid and Legged Robots, Humanoid & Legged Robots - HLR'14, Heidelberg, Germany, May 12-14, 2014.
2. **D. Galdeano**, A. Chemori and S. Krut, *Optimal Pattern Generator Based on a Three-Mass Linear Inverted Pendulum Model for Dynamic Walking*, Workshop on Humanoid and Legged Robots, Humanoid & Legged Robots - HLR'11, Paris, France, February 14-15, 2011.

#### CONFÉRENCES NATIONALES :

1. **D. Galdeano**. *Control of humanoid Robots : Real-time application to a human squat-like motion*. EuroMov inaugural conference - Health in motion, Montpellier, France, June 24-25, 2013
2. **D. Galdeano**, A. Chemori and P. Fraisse. *Partial Human Data in Design of Human-Like Walking Control in Humanoid Robotics*. 8ème édition des Journées Nationales de la Robotique Humanoïde - JNRH'12, Montpellier, France, September 20-21, 2012.
3. **D. Galdeano**, A. Chemori, S. Krut and P. Fraisse. *Influence of the upper links (torso, arms) on dynamic stability and energy consumption during walking*. GT7 Robotique Humanoïde, Paris, France, November 17, 2011.
4. S. Krut, A. Chemori, **D. Galdeano** et al. , *Sherpa, un robot marcheur bipède à actionnement réversible*. 3ème Journées Démonstrateurs en Automatique (Démonstrateur'10), Angers, France, 2010.

## Organisation du manuscrit

Ce manuscrit est organisé de la façon suivante :

Nous débuterons par un chapitre introductif présentant les problématiques liées à la robotique humanoïde ainsi que les notations et termes associés. Nous détaillerons également l'état de l'art de la commande corps-complet des robots humanoïdes.

Nous poursuivrons cette étude par un chapitre d'étude de la marche humaine se basant sur deux expérimentations réalisées en collaboration avec le LABLAB de Rome. Nous terminerons cette étude par une proposition d'utilisation d'un ensemble de données minimales permettant la reproduction du mouvement humain.

Le troisième chapitre est consacré à notre contribution sur l'architecture de la commande hybride cinématique/dynamique. Le principe de cette commande cinématique est associé au contrôle de tâches hiérarchisées basé sur quatre objectifs. Un contrôleur dynamique utilisant le Zero Moment Point (ZMP) est également proposé afin de renforcer la stabilisation du corps en mouvement. Enfin, une architecture globale de commande hybride cinématique/dynamique est synthétisée.

Le quatrième chapitre présente la modélisation et la simulation du robot humanoïde. Ce travail est développé autour de quatre scénarios de simulation soulignant l'efficacité de la loi de commande proposée.

Le cinquième chapitre est consacré aux validations expérimentales pour lesquelles les robots Sherpa et HOAP3 sont présentés. Cinq scénarios d'expérimentation sont détaillés et réalisés.

En conclusion, le dernier chapitre fera un synthèse des travaux et contributions réalisées dans cette thèse ainsi que les perspectives associées.



---

# Introduction à la robotique humanoïde

## Sommaire

---

Problématique de la commande corps-complet . . . . .	1
Objectifs . . . . .	2
Principales contributions . . . . .	2
Publications et communications de l’auteur . . . . .	3
Organisation du manuscrit . . . . .	5

---

## 1.1 Introduction

Ce chapitre est dédié à une introduction à la robotique humanoïde, principalement dans le cadre de la commande corps-complet. Nous commencerons par un bref historique de la robotique humanoïde pour connaître ses origines, suivi d’une présentation des principales problématiques actuelles et champs d’étude liés à la robotique humanoïde. Par la suite, nous continuerons avec une présentation des termes utilisés dans l’analyse de la marche humaine et de la marche humanoïde. Nous finirons par une classification et une analyse de l’état de l’art de la commande corps-complet des robots humanoïdes. Ce chapitre permet donc de mieux comprendre et de situer le contexte des propositions de l’auteur du manuscrit.

## 1.2 Historique de la robotique humanoïde

Pour situer ce travail de recherche, il est important d'établir une chronologie des événements marquants dans l'histoire de la robotique humanoïde.

L'idée de créer un automate intelligent de forme humaine pour aider les êtres humains n'a rien de nouveau. En effet, dès le troisième siècle avant Jésus-Christ, les premiers mécaniciens de la Grèce antique Héron d'Alexandrie et Philon de Byzance se penchent sur la question des automates [Philon de Byzance et de Vaux, 1902]. Ils inventent alors des humanoïdes animés par l'eau, l'air et la vapeur d'eau. Un exemple typique est la serveuse automate qui s'anime quand une coupe est posée dans sa main, sous l'effet de la gravité, et remplit le verre de vin puis d'eau par un système de valves.



(a) Schéma de la serveuse automate [Philon de Byzance et de Vaux, 1902]



(b) Reproduction de la serveuse automate [Kotsanas, 2014]

Figure 1.1: La serveuse automate selon Philon de Byzance

Pendant longtemps les machines produites seront des automates, capable de reproduire le même mouvement mais sans pouvoir s'adapter à l'environnement. Ainsi Léonard de Vinci crée son chevalier robot en 1495 qui peut bouger bras et tête. En France, Jacques de Vaucanson crée de nombreux automates dès 1738 pouvant reproduire des musiques en utilisant des instruments.

L'ajout de capteurs, permettant de passer du statut d'automate à celui de robot, est réalisé pour la première fois en 1915 par Hammond et Miessner. Ils créent alors le chien électrique qui se déplace en fonction de la luminosité grâce à deux capteurs photosensibles. Les premiers robots sont principalement inspirés d'animaux tels que le chien Phillidog de

Henri Piraux en 1928 et le renard de Ducrocq en 1953. Walter Grey crée une tortue cybernétique en 1950 équipée de capteurs tactiles et lumineux.

En 1961, le premier robot industriel est créé par George Devol. Il s'agit d'un bras articulé programmable appelé Unimate qui est utilisé par General Motors sur ses lignes d'assemblage pour déplacer des pièces de 150 kg, le robot pesant 1500 kg.

Le premier robot humanoïde doté d'une marche bipède, appelé Wabot-1, est fabriqué à l'université de Waseda à Tokyo, Japon, en 1973. Ce robot, doté d'un ordinateur embarqué, est capable de voir, de marcher, de parler et d'attraper des objets. Dès lors, la recherche s'empare des robots humanoïdes et nombreux sont les laboratoires qui se fabriquent leur propre robot.

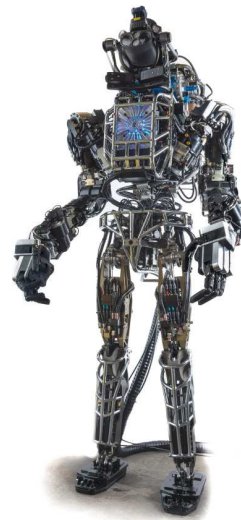
La première version d'ASIMO, le célèbre robot humanoïde fabriquée par HONDA, voit le jour en 2000. Premier robot humanoïde capable de courir, il est utilisé par HONDA pour démontrer leur savoir faire mais n'est pas disponible à la vente.

Une entreprise française, Aldebaran Robotics, crée le robot humanoïde de petite taille (58cm) Nao en 2005. Au vu de son prix et de ses capacités, il est largement diffusé dans les laboratoires de recherche et les universités du monde entier.

Les robots humanoïdes de taille humaine récents sont le HRP-4 (2010) présenté sur la Figure 1.2(a) et l'Atlas (2013) présenté sur la Figure 1.2(b).



(a) HRP-4



(b) Atlas

Figure 1.2: Robots humanoïdes récents de taille humaine utilisés dans la recherche en robotique

Le HRP-4 a été développé par la recherche publique japonaise National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST) et commercialisé par Kawada Industries. D'une taille de 151 cm, pesant 39 kg et doté de 34 degrés de liberté (ddl), ce robot est conçu aux dimensions d'un être humain afin d'ouvrir de nouvelles voies de recherche.

L'Atlas a été créé par Boston Dynamics pour la DARPA (défense militaire américaine). D'une taille de 180 cm, pesant 150 kg et doté de 28 ddl, ce robot a été développé pour l'intervention en zone de désastre comme la catastrophe nucléaire de Fukushima Daiichi. Il a servi de démonstrateur pour de nombreuses équipes lors du DARPA Robotics Challenge en 2014.

Ces derniers robots ont été créés pour permettre de tester les dernières stratégies inventées par les chercheurs. En effet, la robotique humanoïde est un domaine de recherche très actif et nous tenterons de voir les principales problématiques de recherche actuelles dans la prochaine section.

### 1.3 Les principales problématiques liées à la robotique humanoïde

La robotique humanoïde est un domaine d'étude compliqué du fait de la convergence de plusieurs technologies. En effet, pour un robot classique, la maîtrise de l'électronique, la mécanique, et l'informatique sont nécessaires. Pour la robotique humanoïde s'ajoute à cela la bio-mécanique et le contrôle de systèmes instables. La robotique humanoïde s'est donc naturellement fractionnée en plusieurs champs d'études.

Un champ d'étude qui intervient parmi les premiers dans la création d'un nouveau robot est l'étude mécanique. Cette étude mécanique en amont de la conception du robot permet de raisonner sur sa structure. Elle permet d'analyser le comportement des robots, calculer l'espace opérationnel, de générer une structure permettant d'éviter les singularités.

Il est ensuite nécessaire de modéliser le robot, afin de pouvoir le simuler. Si l'étude mécanique permet de produire le modèle géométrique, le modèle dynamique peut seulement être estimé tant que les paramètres ne sont pas mesurés sur le robot réel. Les moteurs et capteurs doivent être modélisés en utilisant des modèles approximant plus ou moins fidèlement leurs caractéristiques selon la précision désirée de la simulation. Les particularités du robot humanoïde, à la fois sous-actionné et redondant, rendent la modélisation compliquée. En particulier, il est nécessaire de considérer le robot comme ayant une base flottante (traditionnellement la hanche) contrairement aux robots manipulateurs à base fixe, ancrés dans le sol. Pour calculer l'évolution de la base flottante dans l'espace, il est nécessaire de prendre en compte les contacts entre le robot et l'environnement. La modé-

lisation des robots humanoïdes et des contacts utilisés dans cette thèse est détaillée dans la section 4.2.

Les robots, par définition, sont composés de capteurs, d'actionneur et d'un traitement de l'information pour relier les informations des capteurs aux mouvements des actionneurs.

Si les actionneurs et la plupart des capteurs sont sensiblement les mêmes que ceux utilisés dans les autres domaines de la robotique, la robotique humanoïde utilise des approches spécialisées pour le traitement des capteurs de forces aux pieds du robot et pour le traitement de la vision. Les capteurs de forces permettent de déterminer le centre de pression et doivent supporter le poids du robot. Le choix du capteur selon sa précision doit être mûrement réfléchi sous peine d'obtenir des mesures inexploitable. Pour la vision, l'apparition de caméras permettant la perception de la profondeur a été un apport majeur pour la robotique mais l'utilisation de ces outils sur des robots humanoïdes est difficile du à la base flottante, aux vibrations et aux mouvements de tête. Les images peuvent être difficiles à exploiter et, en conséquence, la vision est moins utilisée en robotique humanoïde que dans les autres domaines de la robotique.

Une fois la structure du robot mise en place avec les capteurs et actionneurs, il est nécessaire de créer des lois de commande pour contrôler le robot. Le contrôle de mouvement est une discipline à part entière dans l'étude des robots humanoïdes. Elle est séparable en deux domaines d'étude : la locomotion et la manipulation. La locomotion est le déplacement bipède sur le sol. Ce mouvement, loin d'être évident, est produit naturellement par les humains. Beaucoup d'études y sont dédiées comme indiqué dans la suite de ce manuscrit. La manipulation d'objet est la saisie d'objet pour accomplir des tâches. Les champs de recherche actuels sont principalement dans la co-manipulation (à deux bras ou entre deux sujets) et la manipulation dans des environnements fortement contraints. Si beaucoup d'études portent sur la locomotion et la manipulation, d'autres études portent sur la génération de mouvements corps-complet ou encore sur les expressions faciales.

Le dernier champ d'étude est lié à l'autonomie du robot. L'autonomie correspond au besoin de créer un robot qui puisse évoluer seul, afin de pouvoir proposer des modèles grand public de robots humanoïdes. Il s'agit premièrement de l'autonomie énergétique, afin de permettre au robot d'être fonctionnel plus longtemps. Cela passe par de meilleures batteries mais aussi par des actionneurs intelligents et des lois de contrôle adaptées pour ne pas gaspiller de l'énergie inutilement. Il s'agit deuxièmement de l'autonomie de décision, afin de permettre au robot d'agir sans la nécessité de prise de décision d'un opérateur humain. Pour cela, il est nécessaire d'améliorer le logiciel du robot pour lui permettre de mieux comprendre son environnement, apprendre à généraliser les actions qu'il peut faire et lui donner un niveau plus élevé d'abstraction afin de comprendre ce que "faire le repas" implique.

Ce manuscrit sera principalement axé sur la création de loi de commande afin de gé-



nérer des mouvements corps-complet. Pour que la suite de la lecture du manuscrit soit faite avec un vocabulaire commun, il est nécessaire de définir des termes liés à la marche humaine et à la robotique humanoïde dans la partie suivante.

## 1.4 De la marche humaine à la marche humanoïde

Le but de ce manuscrit est de présenter une approche de marche pour la robotique humanoïde. Cette approche s'inspire de la locomotion humaine pour la transposer sur un robot humanoïde. Pour cela, il est important de définir des bases communes de termes liés à la marche humaine et à la robotique humanoïde comme proposé dans cette section.

### 1.4.1 La marche humaine

La marche humaine est le fruit d'une évolution pendant des millions d'années. Au fur et à mesure de cette évolution, elle a permis à l'homme de se déplacer dans son environnement de manière toujours plus optimisée. Si l'apprentissage de la marche intervient très tôt dans la vie humaine, vers un an, il faut plusieurs années pour obtenir un mouvement vraiment efficace énergétiquement qui continue d'évoluer avec les changements métabolique dûs au vieillissement du corps [Rose *et al.*, 2006]. La marche humaine est une référence dans le domaine de la marche des robots humanoïdes car comprendre comment elle est générée, et ce quelle nous apporte, permet de mieux saisir les enjeux et les défis à relever de la marche humanoïde.

Les parties suivantes sont dédiées aux définitions des termes employés pour parler de la marche humaine.

#### 1.4.1.1 Plans anatomiques

La marche humaine, pour être étudiée, nécessite de définir une certaine terminologie.

Pour faciliter l'étude de la marche d'un humain, le mouvement est décomposé selon trois plans principaux présentés sur la Figure 1.3. Il s'agit du plan sagittal, frontal et horizontal. Le mouvement principal de la marche a lieu dans le plan sagittal, cependant de nombreux mouvements complémentaires, tels que le déhanchement, sont situés dans les deux autres plans.

Les trois axes principaux sont aussi illustrés sur la Figure 1.3. Il s'agit de l'axe antéro-postérieur, transversal et longitudinal. L'axe antéro-postérieur est l'axe de déplacement principal.

Ces définitions issues de la bio-mécanique permettent un langage commun afin d'exprimer le mouvement.

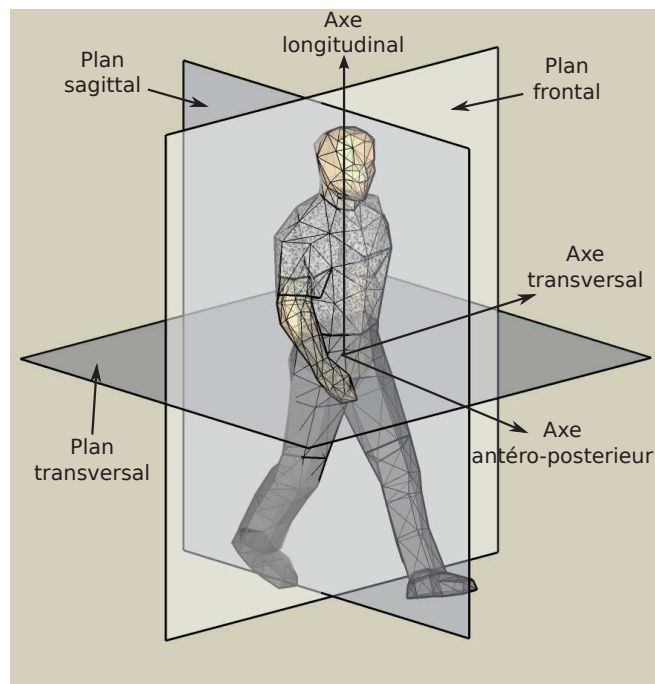


Figure 1.3: Illustration graphique des plans et des axes anatomiques

#### 1.4.1.2 Décomposition du cycle de marche chez l'humain

La marche humaine est une alternance entre phase de simple support, avec un pied au sol et un pied en balancement, et phase de double support où les deux pieds sont en contact avec le sol. Cette alternance constitue ce qu'on appelle le cycle de la marche humaine illustré sur la Figure 1.4. A chaque instant, au moins un pied est en contact avec le sol, par opposition à la course où les deux pieds peuvent être décollés. Pour une marche normale, le cycle dure environ une seconde [Heliot et Pissard-Gibollet, 2005].

La phase de simple appui est aussi appelée phase de simple support. Elle commence au décollage du pied de vol et finit à son atterrissage. Le poids du marcheur repose alors entièrement sur le pied de support. Elle constitue entre 70 % et 80 % du cycle de marche.

La phase de double appui est aussi appelée phase de double support. Elle est effective toute la durée où le marcheur s'appuie sur le sol en utilisant ses deux pieds. Elle constitue entre 20 % et 30 % du cycle de marche.

Pour une marche normale, non perturbée, les cycles sont symétriques comme représentés sur la Figure 1.4. Pour la suite nous appellerons un pas le mouvement entre le poser d'un talon au sol et celui du poser du talon de la jambe opposée au sol. La foulée cor-

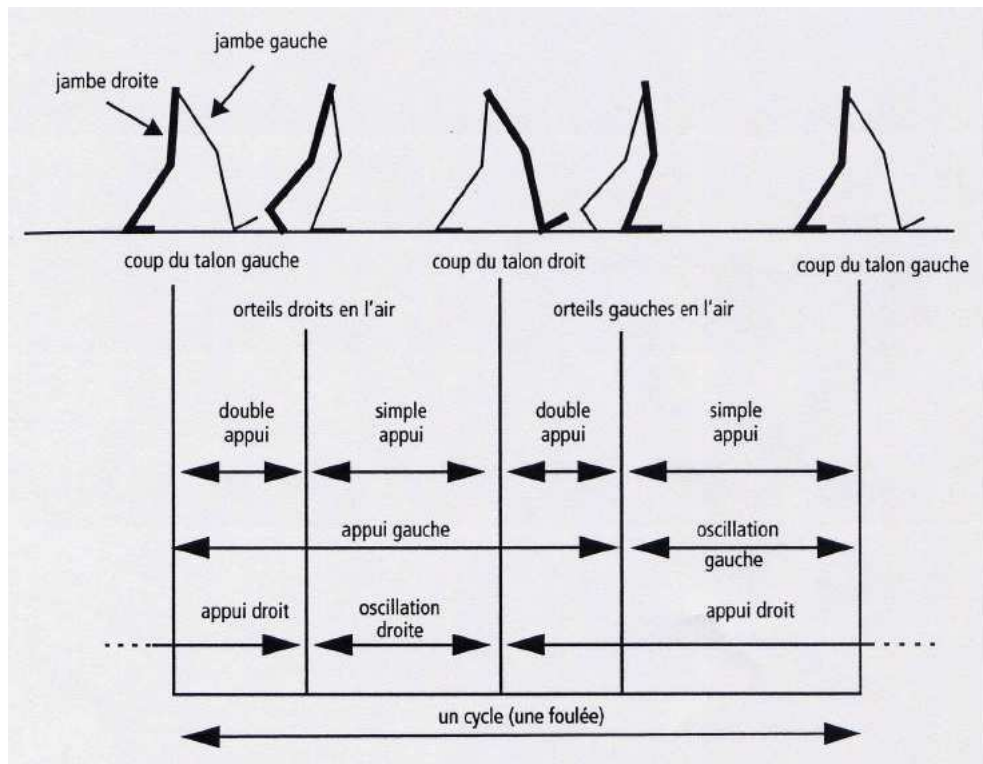


Figure 1.4: Décomposition d'un cycle de marche humaine [Parent, 2003]

respond à deux pas et sépare donc deux posées successives du talon de la même jambe [Azevedo, 2003].

### 1.4.1.3 Cinématique de la marche

La marche humaine est un phénomène complexe, l'unité locomotrice représente environ 33% du poids du corps humain, met en jeu 29 degrés de liberté et nécessite 48 muscles par jambes [Roussel, 1998]. Une telle complexité est difficile à reproduire dans un robot, d'autant plus que les muscles sont des actionneurs qui agissent en translation et les moteurs sont des actionneurs rotatifs.

Il est nécessaire de comprendre par ailleurs que d'autres différences fondamentales sont en action lors de la reproduction du mouvement humain sur un robot. En effet, dans le corps humain, les os démontrent une certaine souplesse là où le robot est constitué de segments indéformables. De même, pour les contacts entre le pied et le sol, le pied de l'humain est déformable là où celui du robot est généralement constitué d'un pavé solide.

#### 1.4.1.4 Bilan énergétique

La marche, optimisée depuis des millénaires, permet une consommation énergétique efficace [Kuo, 2007]. En effet le coût métabolique de la marche est minime par rapport à ce qu'on peut réaliser actuellement sur un robot. Pour une marche normale à la vitesse nominale de 1.25 m/s, un être humain normal de 66 kg a une dépense métabolique de 150 W [Donelan *et al.*, 2002], alors que le HRP-4 a une dépense mécanique de 232 W pour une marche lente.

Les variables minimisées pour produire la marche chez l'humain sont difficiles à discerner [Mombaur *et al.*, 2010]. On peut considérer la minimisation des couples articulaires, mais aussi des vitesses articulaires, du jerk (saccades provoquées par la dérivée de l'accélération) ou encore de termes liés à l'énergie ou au travail mécanique dépensés.

Les différents objectifs suivis inconsciemment par les êtres humains permettent des mouvements peu consommateurs au niveau énergétique et rendement, tout en minimisant le risque de blessures.

### 1.4.2 La marche humanoïde

La marche humanoïde est constituée d'une alternance de pas pour un robot muni de jambes. Il est très difficile de générer une marche stable pour un robot bipède à cause de sa complexité structurelle. En effet, ces robots contiennent de nombreux degrés de liberté dus à leurs nombreuses articulations (cf Figure 1.5).

Ce type de robot permet un déplacement dans un environnement pouvant être encombré, accidenté ou irrégulier. Le robot humanoïde, de par sa conception, est adapté aux déplacements dans un environnement créé par et pour l'être humain. Une des difficultés majeures de la marche humanoïde est que le robot est naturellement instable, le pied de support n'est pas fixé au sol, et par conséquent peut le quitter si les conditions de stabilité ne sont pas réunies. De ce fait, la marche humanoïde nécessite des lois de commande évoluées pour éviter la chute du robot pendant la marche.

Les parties suivantes sont dédiées aux définitions des termes employés pour parler de la marche humanoïde.

#### 1.4.2.1 Décomposition du cycle de marche chez l'humanoïde

La marche humanoïde est un enchaînement de phases de simple et double support semblables à celle de l'humain mais les proportions entre simple et double support peuvent être différentes.

La marche humanoïde comporte aussi une phase d'impact au moment où le pied en balancement touche le sol (voir Figure 1.6). En effet, contrairement aux humains, un robot



(a) ROPID de Robo Garage



(b) HRP-2 de Kawada Industry



(c) QRIO de Sony



(d) ASIMO de Honda

Figure 1.5: Quelques exemples de robots humanoïdes

humanoïde a souvent un pied rigide. Ceci se traduit par un impact lors de cette phase dû à la rigidité qui amorti peu le choc et à la vitesse non nulle de contact entre le pied et le sol.

Cette phase d'impact peut être dangereuse pour le robot, car elle est potentiellement destructive. Au moment de l'impact, une force extérieure de grande amplitude est appliquée via le pied d'impact, sur toute la jambe. Si cette phase n'est pas prise en compte, les réducteurs, moteurs, et même la structure du robot peuvent subir des dégradations mécaniques.

Dans les cas les plus extrêmes, si le robot affiche une certaine compliance, l'impact peut amener à une rotation des moteurs créant ainsi un pic de courant potentiellement ravageur pour l'électronique du robot. La plupart des lois de commande chercheront donc à minimiser la force de l'impact au cours de cette phase.

Pour prendre en compte ces différentes phases, il est courant d'utiliser une loi de commande différente pour chaque phase.

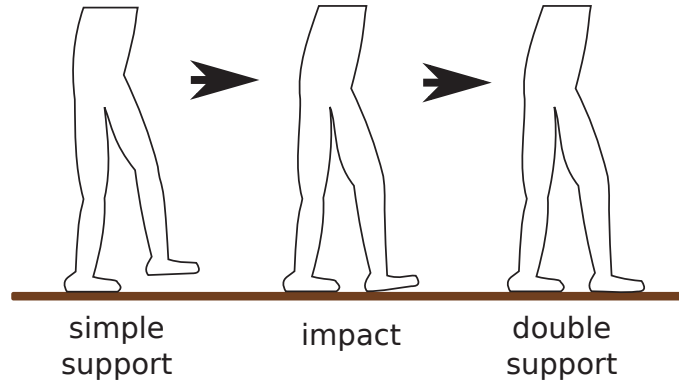


Figure 1.6: Séquence des phases dans la marche.

#### 1.4.2.2 Principaux indicateurs de stabilité

Pour permettre le contrôle des robots humanoïdes et éviter leurs chutes il est nécessaire de pouvoir estimer la stabilité à priori des robots humanoïdes. De nombreux indicateurs de stabilité ont été créés afin de mesurer cette stabilité et pouvoir prévoir si le robot risque de chuter.

De ces nombreux critères, il y en a trois qui sont utilisés dans de nombreuses publications :

- Centre de masse (CoM)
- Zero Moment Point (ZMP)
- Foot Rotation Indicator (FRI)

L'utilisation de ces critères permet de générer des lois de commande stable mais le mouvement généré peut être fortement conditionné par le critère utilisé.

**CoM.** Le Centre de masse (CoM) [Ma *et al.*, 2005] est la somme pondérée des centres de masse de chaque segment du robot. La formule mathématique pour déterminer le centre de masse est la suivante :

$$com = \frac{\sum m_i p_i}{M} \quad (1.4.1)$$

Où  $com$  est la position du centre de masse,  $m_i$  est la masse du  $i^{ème}$  segment du robot,  $p_i$  est la position du centre de masse du  $i^{ème}$  segment du robot et  $M$  est la masse totale du robot.

La projection du centre de masse sur le sol est un critère de stabilité statique. Si la projection du CoM est dans le polygone de sustentation<sup>1</sup> pendant que le robot est immobile alors le robot est stable (voir Figure 1.7). Si, au contraire le CoM est hors du polygone de sustentation pendant que le robot ne bouge pas, alors il bascule et chute changeant ainsi la forme du polygone de sustentation. Le centre de masse est aussi utilisé dans le calcul de la stabilité dynamique.

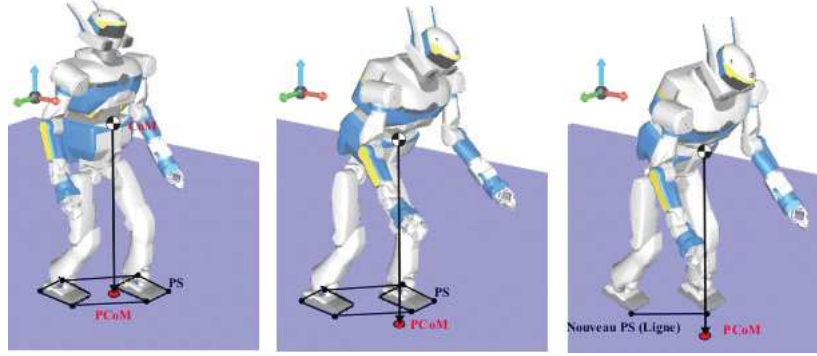


Figure 1.7: Projection du Centre de masse (CoM) par rapport au polygone de sustentation [Nuñez Nalda, 2008].

**ZMP.** Le Zero Moment Point (ZMP) [Vukobratović et Borovac, 2004; Sardain et Bessonnet, 2004] est le point sur la surface de contact où le moment est nul. C'est le critère le plus utilisé pour déterminer la stabilité dynamique du robot. Si le ZMP est dans le polygone de sustentation alors le robot est stable, sinon le robot est en déséquilibre et il peut chuter (voir Figure 1.8).

La valeur du ZMP dépend des positions, vitesses et accélérations articulaires, ainsi que des efforts extérieurs :

$$\text{ZMP}(t) = f(q(t), \dot{q}(t), \ddot{q}(t), f_e(t)) \quad (1.4.2)$$

Les différentes méthodes pour calculer le ZMP sont présentées dans [Kajita *et al.*, 2009].

Dans le cas particulier du robot immobile, la projection du CoM coïncide avec le ZMP.

**FRI.** Le Foot Rotation Indicator (FRI) [Goswami, 1999] est le point sur la surface de contact pied/sol où les forces de réaction du sol agiraient de façon à maintenir le pied immobile. Cette définition permet l'existence du FRI en dehors du polygone de sustentation,

1. Le polygone de sustentation est défini comme étant l'enveloppe convexe des points d'appui des pieds sur le sol.



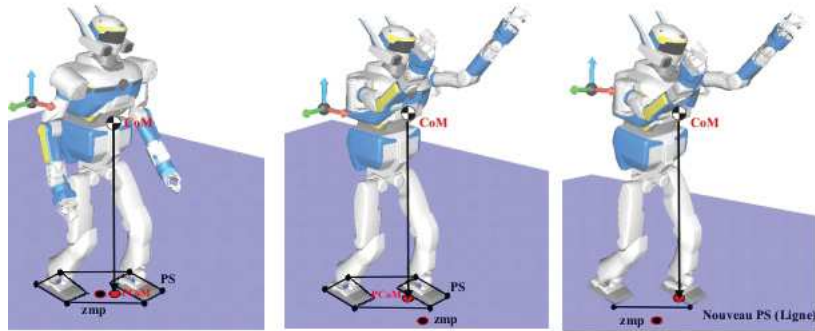


Figure 1.8: Position du Zero Moment Point (ZMP) par rapport au polygone de sustentation, un mouvement brusque des bras peut faire chuter le robot [Nuñez Nalda, 2008].

permettant de quantifier la perte d'équilibre. Dans le cas où le FRI est dans le polygone de sustentation, il agit comme le ZMP. C'est un critère de stabilité dynamique qui est peu utilisé en pratique.

#### 1.4.2.3 Les modes de marche humanoïde

Dans la marche humanoïde, comme dans la marche humaine, deux types de marche sont exploités selon les objectifs à atteindre.

**Marche quasi-statique.** La marche quasi-statique est une succession de posture stables statiquement. Elle nécessite que la projection du centre de masse soit à l'intérieur du polygone de sustentation afin de garantir l'équilibre statique comme illustré sur la Figure 1.9).

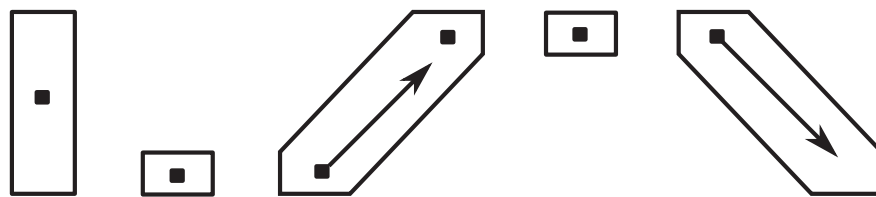


Figure 1.9: Marche quasi-statique bipède, vue de dessus, (■ : CoM) projeté sur le polygone de sustentation, la flèche indique le sens de déplacement du CoM.

Elle a été la première utilisée de par la simplicité et le peu de calcul nécessaire à sa mise en place. Cette marche est cependant très lente car pour pouvoir négliger les effets dynamiques et considérer le modèle comme statique, il faut que les vitesses soient faibles. En effet, elle se base sur l'utilisation de la position du CoM uniquement pour produire la marche, négligeant de fait les effets inertiels.



Ces effets inertiels deviennent important à grande vitesse et ne peuvent plus être négligés. On utilise alors la marche dynamique pour pouvoir se déplacer plus rapidement.

**Marche dynamique.** La marche dynamique est la marche où l'équilibre statique n'est plus assuré mais l'équilibre dynamique est assuré (voir Figure 1.10). Cette marche, plus difficile à calculer, est nettement plus rapide. Actuellement, des vitesses semblables à celles des humains sont déjà réalisées. Du fait que l'équilibre statique ne soit plus assuré, on ne peut s'arrêter brutalement pendant la marche sans une stratégie appropriée.

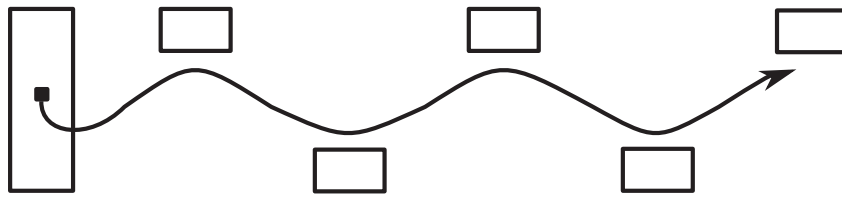


Figure 1.10: Marche dynamique d'un robot bipède (■ : CoM), la flèche indique la trajectoire de la projection du CoM, les rectangles représentent le polygone de sustentation.

Si la marche dynamique est importante pour les déplacements rapides, la marche quasi-statique reste utilisée dans les environnements encombrés ou nécessitant d'autres prises de contact, avec les mains par exemple.

#### 1.4.2.4 Concepts géométriques en robotique

Pour comprendre les notions abordées dans ce manuscrit, il est nécessaire de présenter les fondations basiques de géométrie utilisées par la suite.

##### Une position.

Un point  $p$  dans l'espace est défini par trois composantes :

$$p = (x, y, z) \in \mathbb{R}^3$$

Ces composantes  $x$ ,  $y$  et  $z$  sont les projections du point sur les trois axes du repère cartésien global. Un point peut donc définir une position dans l'espace cartésien, aussi appelé espace opérationnel.

##### Un erreur de position.

Un vecteur  $v$  est la différence entre deux points,  $p$  et  $q$ , de sorte que  $v = p - q$ . Un vecteur peut représenter une erreur de position, en prenant pour  $p$  une position désirée et pour  $q$  une position actuelle.

**Une rotation.**

Une rotation dans l'espace peut être définie de plusieurs façon. Les représentations principales des rotations tridimensionnelles sont les angles d'Euler, les quaternions, la représentation axe et angle de rotation et les matrices de rotation. Ces représentations ont chacune des avantages et des défauts.

Les angles d'Euler est la représentation la plus ancienne et intuitive. Elle est représentée par 3 valeurs  $(\phi, \theta, \psi)$ , qui correspondent à trois rotations successive autour de différents axes. Les compositions des rotations atteignent 12 possibilités. La plus classique est composée d'une rotation autour de z, une rotation autour de x puis une rotation autour de z, notée z-x-z. Certaines disciplines donnent des noms différents en fonction de l'ordre des rotations (Euler, Cardan, Tait-Byan ou encore lacet-roulis-tangage). De plus, les rotations peuvent s'effectuer autour des axes fixes de référence ou des axes mobiles créés par les rotations du repère. Les compositions des rotations atteignent alors 24 possibilités.

Le principal défaut des angles d'Euler est le phénomène de blocage de cardan. Par exemple, pour un systèmes de rotations roulis, tangage et lacet, si le tangage est de  $90^\circ$  vers le haut ou le bas, le roulis et le lacet correspondent au même mouvement, et un degré de liberté est perdu.

Les quaternions sont un type de nombre hypercomplexe. Peu intuitifs, ils sont représentés par 4 valeurs  $(qw, qx, qy, qz)$ . L'idée principale est de représenter la rotation dans un espace complexe à quatre dimensions en prenant :

$$q = a + ib + jc + kd$$

avec  $a, b, c$  et  $d$  les paramètres de la rotation,  $i, j, k$  représentent les axes imaginaires complexes. Les quaternions sont très utilisés vu qu'ils permettent d'éviter le phénomène de blocage de cardan et n'offre aucune singularité. Le peu d'intuitivité de cette représentation peu rendre complexe l'analyse des valeurs obtenues.

La représentation axe et angle de rotation est définie par 3 ou 4 valeurs (angle,  $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$  ou  $r_x, r_y, r_z$ ). Elle consiste en un axe de rotation dans l'espace (donc un vecteur de dimension 3) et un angle de rotation autour de cet axe (qui peut être une valeur ou la norme du vecteur d'axe de rotation selon si 4 ou 3 valeurs sont utilisées). Cette représentation est assez proche des quaternions au niveau calculatoire mais bien plus intuitive. Elle a deux singularités lorsque l'angle de rotation est égal à  $0^\circ$  ou  $180^\circ$ . Si l'angle de rotation vaut  $0^\circ$  ou  $180^\circ$  alors l'axe de rotation importe peu, l'axe de rotation peut alors subir de grosses modifications sur ses coordonnées pour de petites rotations dans l'espace.

Les matrices de rotation sont représentées par 9 valeurs.

$$R = \begin{bmatrix} r_x & r_y & r_z \end{bmatrix} \quad (1.4.3)$$

Les vecteurs  $r_x = [r_{11}, r_{21}, r_{31}]^T$ ,  $r_y = [r_{12}, r_{22}, r_{32}]^T$  et  $r_z = [r_{13}, r_{23}, r_{33}]^T$  sont les projections des axes du repère cartésien liées à l'objet en rotation dans le repère cartésien de référence. Étant donné que 9 valeurs sont utilisées pour définir l'orientation, il y a redondance d'information. En effet,  $r_x$ ,  $r_y$  et  $r_z$  sont orthogonaux, ce qui signifie :

$$r_i^T r_j = 0 \quad \forall i \neq j \quad (1.4.4)$$

$$r_i^T r_i = 1 \quad \forall i \quad (1.4.5)$$

et pour les matrices de rotations :

$$RR^T = RR^T = \mathbb{I} \quad (1.4.6)$$

$$R^{-1} = R^T \quad (1.4.7)$$

$$\det(R) = 1 \quad (1.4.8)$$

où  $\mathbb{I} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  représente la matrice d'identité et  $A^T$  est la transposée de  $A$ .

Les matrices de rotation appartiennent au groupe spécial orthogonal  $SO(3)$  [Li *et al.*, 1994; Mahony *et al.*, 2009], ce qui permet des opérations non seulement continues, mais lisses (de classe  $\mathcal{C}^\infty$ ), ainsi  $SO(3)$  est un groupe de Lie. Cette propriété permet le calcul de l'erreur d'orientation présenté par la suite. Il est important de noter que cette représentation ne présente pas de singularité.

Les matrices de rotation sont les plus performantes pour les rotations de vecteurs mais moins performantes que les quaternions pour les compositions de rotations. Les deux représentations ne souffrent pas de singularités. Le choix d'utiliser l'une ou l'autre des représentations dépend alors de l'application. Pour le calcul de la commande de robot humanoïde, les matrices de rotation nous ont semblé le choix le plus pertinent et seront donc utilisées dans ce manuscrit par la suite.

### Une erreur d'orientation.

L'erreur d'orientation est définie par :

$$E_{ori} = R_c (\ln(R_c^{-1} R_r))^V \quad (1.4.9)$$

avec  $R_c \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  représentant la matrice d'orientation cible et  $R_r \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  représentant la matrice d'orientation de référence.

L'opérateur de matrice logarithmique  $\omega = (\ln(\bullet))^V$  permet de trouver le vecteur de vitesse de rotation afin d'effectuer des interpolations d'orientations en reliant le groupe de

Lie (SO(3)) à l'algèbre de Lie ( $\mathfrak{so}(3)$ ). Il est défini par :

$$(\ln R)^\vee = \begin{cases} [0 \ 0 \ 0]^\top & \text{if } R = \mathbb{I} \\ \frac{\theta}{2 \sin \theta} \begin{bmatrix} r_{32} - r_{23} \\ r_{13} - r_{31} \\ r_{21} - r_{12} \end{bmatrix} & \text{if } R \neq \mathbb{I} \end{cases} \quad (1.4.10)$$

avec :

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \text{ and } \theta = \cos^{-1} \left( \frac{r_{11} + r_{22} + r_{33} - 1}{2} \right) \quad (1.4.11)$$

Plus de détails sur cet opérateur sont disponibles dans les livres de Kajita [Kajita *et al.*, 2009] et Li [Li *et al.*, 1994].

#### Une pose.

Une pose  $f$  dans l'espace est définie par six composantes :

$$f = (x, y, z, \phi, \theta, \psi) \in \mathbb{R}^6$$

Les trois premières composantes définissent la position dans l'espace cartésien et les trois composantes suivantes définissent l'orientation dans l'espace cartésien.

#### Une erreur de pose.

Une erreur de pose  $\varepsilon_f$  dans l'espace est défini par six composantes :

$$\varepsilon_f \in \mathbb{R}^6$$

Les trois premières composantes définissent l'erreur de position dans l'espace cartésien et les trois composantes suivantes définissent l'erreur d'orientation dans l'espace cartésien.

## 1.5 État de l'art sur la commande corps-complet des robots humanoïdes

Au cours des dernières années, de nombreuses approches pour contrôler les robots humanoïdes ont vu le jour. Dans ce manuscrit nous nous intéresserons principalement à la commande corps-complet des robots humanoïdes.

### 1.5.1 Aperçu et classification des approches existantes

Les approches existantes pour le contrôle corps-complet des robots humanoïdes peuvent être classifiées selon trois axes principaux :

- basées sur l'optimisation,
- basées sur la capture du mouvement humain,
- basées sur le formalisme de tâches.

Ces approches sont illustrées sur la Figure 1.11 et détaillées par la suite.

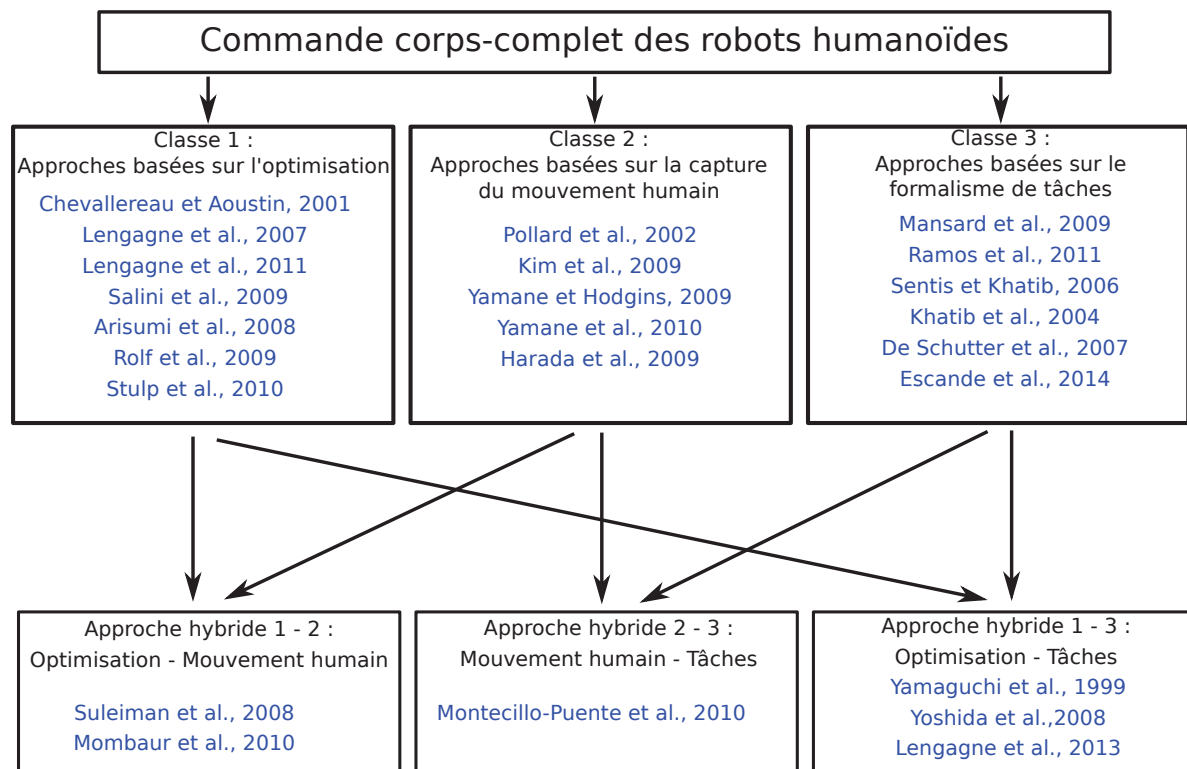


Figure 1.11: Classification de l'état de l'art de la commande corps-complet des robots humanoïdes.

### 1.5.2 Classe 1 : Approches basées sur l'optimisation

Les approches de commande corps-complet basées sur l'optimisation calculent le mouvement en minimisant certains critères de types énergies consommée, trajectoire et couples articulaires [Chevallereau et Aoustin, 2001; Lengagne *et al.*, 2007; Salini *et al.*, 2009]. Ces approches utilisant des calculs itératifs pour les trajectoires ne sont, la plupart du temps, pas réalisables en temps-réel, car très longs à calculer.

En effet les temps de calcul pour des mouvements optimaux peuvent atteindre plusieurs heures, voir plusieurs jours [Lengagne *et al.*, 2011]. Les mouvement résultants étant très optimisés, ils sont très efficace sur une tâche donnée, mais difficilement généralisable ; en particulier dans un environnement dynamique où des perturbations imprévues peuvent se produire.

Si le robot exécute le mouvement calculé et qu'une perturbation survienne, deux approches classiques peuvent être utilisées : soit le robot continue son mouvement en boucle ouverte en risquant de tomber car la perturbation est ignorée ; soit le robot réagit en modifiant ses trajectoires et dans ce cas, il faut décider des stratégies de modification de la trajectoire afin de regagner au plus tôt la trajectoire calculée tout en évitant une perte d'équilibre.

Pour pouvoir être calculable, le problème d'optimisation doit être posé avec un nombre raisonnable de variables. Pour cela les trajectoires sont souvent définies comme des B-splines [Arisumi *et al.*, 2008] afin d'avoir un nombre réduit de paramètres à explorer.

On peut associer les techniques d'apprentissage [Rolf *et al.*, 2009; Stulp *et al.*, 2010] et celle utilisant les Central Pattern Generator (CPG) [Ijspeert, 2008] à celle basées optimisation car le but et les méthodologies sont les mêmes. Là encore, les algorithmes d'apprentissage nécessitent de nombreuses itérations pour converger vers une solution satisfaisante.

### 1.5.3 Classe 2 : Approches basées sur la capture du mouvement humain

Les approches de commande corps-complet basées sur la capture du mouvement humain utilisent le mouvement numérisé d'un humain pour le reproduire, tout ou en partie, sur un robot humanoïde. Ces approches utilisent les systèmes classique de capture du mouvement, issus du monde du cinéma et des jeux vidéos, afin de numériser des mouvements de marche ou des mouvements correspondant à des tâches précises.

Le mouvement numérisé est ensuite transposé sur le robot humanoïde en utilisant soit des projections géométriques, soit en extrayant des valeurs caractéristiques du mouvement afin de choisir les paramètres à reproduire. En effet, malgré les ressemblances structurelles évidentes entre un humain et un robot humanoïde, les mouvements ne peuvent être directement reproduits sur un robot humanoïde car l'appareil locomoteur humain est bien plus complexe que celui d'un robot. Si les mouvements étaient directement reproduits, le robot tomberait dans la plupart des cas. Le mouvement doit alors être adapté pour prendre en compte les spécificités des structures d'un robot humanoïde tels que les limites articulaires par exemple [Pollard *et al.*, 2002].

Les approches de projection géométrique du mouvement ont été principalement marquées par les travaux de [Kim *et al.*, 2009; Yamane et Hodgins, 2009; Yamane *et al.*, 2010] où le mouvement venant de l'humain est reproduit mais une stabilisation dynamique basée sur un LQR pour pendule inversé est ajoutée pour rendre le mouvement global stable.

Les approches extrayant les caractéristiques du mouvement permettent de reconstruire le mouvement humain à partir d'un jeu réduit de données. Dans [Harada *et al.*, 2009], les paramètres extraits sont la pose du buste et l'orientation de la cheville. Les paramètres sont ensuite extraits en utilisant une approximation aux moindres carrés puis le mouvement est reconstruit sur le robot.

#### 1.5.4 Classe 3 : Approches basées sur le formalisme de tâches

La commande corps-complet peut être aussi générée en utilisant le formalisme de tâches. La première formulation de l'utilisation de la redondance d'actionnement fut formulée par Liegeois [Liegeois, 1977] afin de respecter des contraintes articulaire sur un bras manipulateur.

L'approche basée sur le formalisme de tâches a été formulée par Nakamura [Nakamura *et al.*, 1987] et Siciliano [Siciliano et Slotine, 1991] pour des applications sur des bras robotisés. Elle permet le suivi de plusieurs objectifs, appelés tâches, de manière parallèle tout en imposant une hiérarchie dans l'exécution du mouvement. Ce formalisme permet de découpler la consigne en position de la consigne en orientation pour un bras robotique par exemple et permet même l'évitement d'obstacle se situant dans l'espace de travail.

Cette approche a été transposée sur les robots humanoïdes par Mansard [Mansard *et al.*, 2009] au travers du formalisme de pile de tâches. Le formalisme de pile de tâches permet d'ajouter et de retirer des tâches (objectifs) pendant l'exécution du mouvement rendant la génération de mouvement corps-complet modulaire. Ceci permet de générer des mouvements complexes à partir de primitives simples, bornées dans le temps. L'enchaînement des tâches étant alors totalement géré par le formalisme de pile de tâches. Ce formalisme a été largement utilisé sur les robots humanoïdes [Ramos *et al.*, 2011; Mansard *et al.*, 2009; Sentis et Khatib, 2006].

Plusieurs autres formulations de système basé tâches pour la robotique humanoïde ont vu le jour, notamment "Whole body framework" proposé par Khatib [Khatib *et al.*, 2004] ou encore "iTASC" développée par De Schutter [De Schutter *et al.*, 2007; Smits *et al.*, 2009]. La formulation par tâches a fortement évolué pour permettre l'utilisation d'inégalités qui peuvent être utiles pour décrire certaines tâches [Escande *et al.*, 2014]. Le principal avantage d'une formulation basée tâches est qu'il est possible de générer des lois de commande complexe à partir d'un jeu d'objectifs réduit [Dalibard *et al.*, 2011].

#### 1.5.5 Approche hybride 1 - 2 : Optimisation - Mouvement humain

Le mouvement humain est difficile à adapter sur une structure de robot. De cette constatation est née une approche hybride consistant à capturer le mouvement de l'humain et le faire rejouer sur le robot en l'adaptant grâce à une optimisation pour respecter les contraintes spécifiques aux robots humanoïde.

Dans [Suleiman *et al.*, 2008], les données issues de la capture de mouvement de l'humain sont reproduites sur les positions articulaires. Une optimisation est ensuite réalisée pour minimiser les différences entre les positions articulaires désirées et celle du robot en prenant en compte les contraintes telles que les limites articulaires ou limites en couple. Les trajectoires articulaires utilisent des B-splines pour réduire le nombre de paramètres à ajuster.

Dans [Mombaur *et al.*, 2010], une optimisation inverse est appliquée sur les mouvements humain afin de trouver quels sont les paramètres optimisés par un être humain. Ceux-ci sont ensuite rejoués sur un robot pour produire un mouvement semblable à celui d'un humain.

### 1.5.6 Approche hybride 2 - 3 : Mouvement humain - Tâches

Il peut être intéressant de décrire le mouvement humain sous forme de tâches afin de faciliter la reproduction des mouvements liés à la tâche que l'on veut imiter en négligeant les mouvements parasites. Dans [Montecillo-Puente *et al.*, 2010], cette approche est utilisée en reproduisant les mouvements des extrémités des membres ainsi que leur orientation (Humanoid Normalized model). Cette approche permet de reproduire fidèlement une posture donnée mais ne permet pas la marche car peu adaptée aux mouvements dynamiques.

### 1.5.7 Approche hybride 1 - 3 : Optimisation - Tâches

Très tôt, les ressources nécessaires pour le calcul de l'optimisation ont nécessité de calculer le mouvement dans un sous-espace de l'espace articulaire. Les chercheurs ont naturellement utilisé l'espace opérationnel pour permettre d'optimiser une trajectoire de dimension réduite comme la trajectoire du tronc dans l'espace opérationnel [Yamaguchi *et al.*, 1999] par exemple.

La réduction de l'espace de travail à l'aide de tâches permet de générer des trajectoires multi-contact très complexes comme pour s'asseoir sur une chaise en se tenant à une table [Lengagne *et al.*, 2013] ou pour déplacer un objet trop lourd pour être porté [Yoshida *et al.*, 2008].

## 1.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la robotique humanoïde au travers de son histoire, ses problématiques et des définitions associées.



Nous avons aussi présenté un état de l'art de la commande corps-complet des robots humanoïdes. Les principales approches sont basées sur l'optimisation, la capture du mouvement, ou encore le formalisme de tâches.

Dans le chapitre suivant, une utilisation de la capture du mouvement pour la compréhension de la marche est présentée. L'architecture de commande proposée dans le chapitre 3 s'appuie sur le formalisme de tâches et sur les leçons extraites de l'étude de la marche humaine du chapitre suivant.

---

# Étude de la marche humaine

## Sommaire

---

1.1	Introduction . . . . .	7
1.2	Historique de la robotique humanoïde . . . . .	8
1.3	Les principales problématiques liées à la robotique humanoïde . . . . .	10
1.4	De la marche humaine à la marche humanoïde . . . . .	12
1.5	État de l'art sur la commande corps-complet des robots humanoïdes . . .	23
1.6	Conclusion . . . . .	27

---

## 2.1 Introduction

Ce chapitre présente l'étude de la marche humaine réalisée pour permettre la génération d'une marche bio-inspirée sur des robots humanoïdes.

Les scénarios proposés pour cette étude sont présentés en premier lieu, suivi de l'expérimentation basée sur la capture du mouvement ainsi que la présentation des outils nécessaires pour cette étude. Un formalisme pour transposer ces mouvements sur une structure anthropomorphique simplifiée est proposé par la suite avec, à la fin, une première analyse des résultats obtenus.

Ce formalisme sera étendu pour créer une architecture de commande dédiée aux robots humanoïdes dans le chapitre 3.

## 2.2 Scénarios proposés pour l'étude de la marche

La marche humaine optimise naturellement la consommation énergétique du corps-complet pendant l'exécution des mouvements. De ce fait, elle devient un cas d'étude idéal pour créer un générateur de trajectoire pour les robots humanoïdes. Pour pouvoir transposer les mouvements optimaux de l'humain sur des robots humanoïdes, une analyse de la marche humaine est nécessaire. L'étude proposée a été divisée selon deux objectifs :

**Dans le premier :** l'influence des mouvements des membres supérieurs (bras) sur la dépense énergétique pendant la marche est analysée.

**Dans le second :** l'influence de l'amplitude du Centre de masse (CoM), selon l'axe transversal et l'axe longitudinal (cf. section 1.4.1.1), est analysée.

### 2.2.1 Influence des mouvements des bras

Dans le but d'étudier l'influence des mouvements des bras et de la coordination bras-jambes, plusieurs scénarios ont été réalisés.

Pour chaque sujet, il est demandé d'effectuer des marches sur une courte distance avec les scénarios suivants :

- marche normale,
- marche en gardant volontairement les bras le long du corps,
- marche avec balancement des bras anti-normal,
- marche avec une amplitude du balancement des bras exagérée et
- marche avec bras attachés le long du corps.

Quatre essais sont réalisés par scénario, deux aller-retours dans la pièce d'expérimentation. Le nombre total d'enregistrements est de 20 essais par sujet. Le pied de départ pour la marche n'est pas imposé et est laissé au libre choix du sujet. La vitesse de déplacement est choisie par le sujet lui-même et correspond à sa vitesse de confort. Le scénario "*marche normale*" correspond à une marche naturelle du sujet.

Le scénario "*marche en gardant volontairement les bras le long du corps*" correspond à une marche où le sujet contraint les mouvements de ses bras pour les maintenir le long du corps, empêchant le balancement naturel des bras.

Le scénario "*marche avec balancement des bras anti-normal*" correspond à une marche où le sujet contraint les mouvements de ses membres supérieurs pour avancer le bras gauche avec la jambe gauche. Dans l'instant qui suit, pour le pas suivant, il fait la même chose de façon symétrique du côté droit. Ceci est en opposition avec une marche classique où l'on avance les bras et pieds opposés.

Le scénario "*marche avec une amplitude du balancement des bras exagérée*" correspond à une marche où le sujet exagère volontairement le balancement naturel de ses bras, en augmentant l'amplitude du mouvement.

Le scénario "*marche avec bras attachés le long du corps*" correspond à une marche où les bras du sujet sont attachés par une sangle afin de les maintenir le long du corps.

Il est attendu que la marche naturelle soit optimale par rapport à la dépense énergétique. Les marches avec perturbations volontaires du mouvement devraient indiquer une dépense énergétique supérieure. La marche où la contrainte est extérieure est intéressante car le sujet ne fournissant pas d'effort sur les bras, la dépense énergétique peut être moins importante que dans le cas de la marche normale.

### 2.2.2 Influence de l'amplitude du CoM

Pour l'étude de l'influence de l'amplitude du CoM, plusieurs scénarios ont été réalisés. Pour chaque sujet, il est demandé de marcher à plusieurs vitesses. Pour chaque vitesse, il est demandé d'exagérer, tour à tour, l'amplitude du déplacement du CoM selon l'axe transversal puis l'axe longitudinal. Une marche normale est aussi demandée comme référence. Les scénarios réalisés sont résumés dans le tableau 2.1.

Deux essais sont réalisés par scénario, consistant en un aller retours dans la pièce d'expérimentation. Le nombre total d'enregistrement par sujet est de 40 essais. Pour cette étude aussi, le pied de départ pour la marche n'est pas imposé et est laissé au libre choix du sujet.

Tableau 2.1: Scénarios proposés pour l'étude de l'influence de l'amplitude du CoM sur la dépense énergétique pendant la marche humaine

Consigne d'amplitude du CoM	Vitesse de marche			
	Très lentement	Lentement	Normalement	Rapide
	Normal	Normal	Normal	Normal
	Large CoML	Large CoML	Large CoML	Large CoML
	Large CoMT	Large CoMT	Large CoMT	Large CoMT
	Petit CoML	Petit CoML	Petit CoML	Petit CoML
	Petit CoMT	Petit CoMT	Petit CoMT	Petit CoMT

Pour les consignes d'amplitude du CoM, les scénarios sont explicités ci-après. Le scénario "*Normal*" correspond à une marche naturelle.

Le scénario "*Large CoML*" correspond à un mouvement amplifié du déplacement du CoM selon l'axe longitudinal. Visuellement, le sujet doit marcher en exagérant le déplacement verticaux du haut du corps.

Le scénario "*Large CoMT*" correspond à un mouvement amplifié du déplacement du CoM selon l'axe transversal. Visuellement, le sujet doit marcher en exagérant le balancement des hanches et du haut du corps sur les cotés.

Le scénario "*Petit CoML*" correspond à un mouvement réduit du déplacement du CoM selon l'axe longitudinal. Visuellement, le sujet doit marcher en essayant de garder le haut du corps à une hauteur constante.

Le scénario "*Petit CoMT*" correspond à un mouvement réduit du déplacement du CoM selon l'axe transversal. Visuellement, le sujet doit marcher en essayant de minimiser le balancement des hanches et du haut du corps sur les côtés.

Il est attendu que la marche naturelle soit la plus efficace du point de vue dépense énergétique. L'analyse des mouvements capturés pour la marche naturelle devrait aussi montrer un rapport entre les vitesses de marche et les amplitudes de déplacement du CoM privilégié par les sujets. Les autres scénarios de marche sont utilisés pour étudier les stratégies employées par les sujets pour maintenir la stabilité lors des déplacements rapides avec des contraintes perturbant le mouvement.

## 2.3 Capture du mouvement : Du concept à l'expérimentation

Pour pouvoir réaliser l'étude de la marche proposée dans la section précédente, il est nécessaire de pouvoir mesurer et analyser le mouvement des sujets lors de la marche. La capture de mouvement (*Motion Capture* en anglais) correspond au processus permettant de capturer les mouvements d'un sujet et les sauvegarder dans un format numérique. Le format numérique contient un ensemble de poses ou de trajectoires dans des représentations informatiques. Ces techniques sont couramment utilisées en recherche biomécanique, en animation d'acteurs virtuels pour les industries du cinéma et du jeu-vidéo, ou encore en robotique humanoïde.

La capture de mouvement a été réalisée au laboratoire de l'université de Rome LABLAB, décrit ci-après.

### 2.3.1 Le LABLAB : Un laboratoire d'analyse du mouvement

L'étude de la marche a été réalisée au laboratoire LABLAB (Laboratory of Locomotor Apparatus Bioengineering, Department of Human Movement and Sports Sciences, Uni-

versity of Rome "Foro Italico") en Italie dans le cadre du projet de coopération de type EGIDE.

Ce laboratoire, dirigé par le professeur Aurelio Cappozzo, est spécialisé dans l'analyse biomécanique du mouvement humain pour les domaines du sport et de la réhabilitation. Les principaux axes de recherche du laboratoire sont :

- l'étude de la cinématique des articulations en utilisant la stéréo-photogrammétrie, la dynamométrie et les capteurs inertiels,
- le développement de méthodes de traitement des données biomécaniques,
- les capteurs inertiels,
- l'évaluation des capacités motrices et les performances motrices de sujets sains ou en situation d'invalidité, et
- l'analyse biomécanique des activités sportives.

Cette collaboration entre le LIRMM et le LABLAB a été initiée par Dr. Vincent Bonnet (ancien doctorant du LIRMM), qui est parti en post-doctorat au LABLAB.

Les expérimentations ont été réalisées dans ce laboratoire disposant d'une plate-forme expérimentale sophistiquée pour la mesure du mouvement, décrite ci-après.

### 2.3.2 Présentation de la plate-forme expérimentale

Le laboratoire LABLAB dispose d'une plate-forme de capture du mouvement humain spécialisée dans la mesure de performances sportives. Cette plate-forme est constituée d'un système de vision Vicon®, disposant de neuf caméras, et de trois plate-formes de mesure de force. Ces équipements sont décrits dans la suite de cette section.

#### 2.3.2.1 Le système de capture de mouvement Vicon

Le laboratoire LABLAB utilise un système de capture du mouvement de la marque Vicon®.

Un exemple de système de capture de mouvement utilisant le principe Vicon® est illustré sur la Figure 2.1. Le système est composé d'un ensemble de caméras et d'une unité de traitement. Le sujet où l'objet sur lequel le mouvement est mesuré est alors équipé d'un ensemble de marqueurs réfléchissants. Pour être reconstruit avec précision, la séquence de capture doit se dérouler dans le volume de capture visible par l'ensemble des caméras. Chaque caméra de capture est une caméra à haute fréquence d'acquisition (120 images par seconde) entourée par un anneau de LED (cf. Figure 2.2) qui émettent une lumière infrarouge, invisible par l'œil humain, capturée par les caméras.

Les marqueurs sont constitués d'une petite sphère (14 mm de diamètre) de plastique recouverte d'un matériel réfléchissant la lumière infrarouge, afin qu'il soit possible de dis-

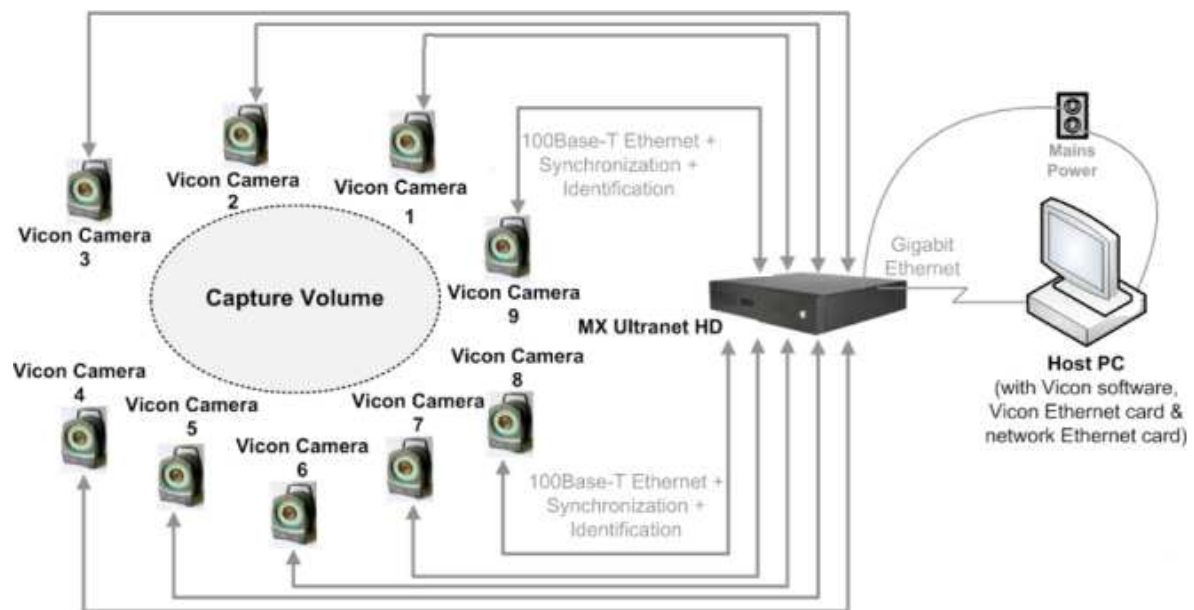


Figure 2.1: Système de capture de mouvement Vicon® constitué de plusieurs caméras entourant l'espace de mouvement, d'un ordinateur équipé du logiciel Vicon Nexus et d'une unité d'interface entre les caméras et l'ordinateur.



Figure 2.2: Camera Vicon® pour la capture de mouvement.

tinguer les marqueurs des autres objets sur l'image issue des caméras, et d'un pied adhésif pour coller sur le sujet.

Dans notre cas, le système utilisé est un système Vicon® 1 équipé de 9 caméras de type Vicon-MX cadencées à une fréquence de 120 Hz dont la mise en place définit le volume utile de capture qui est de  $6 \times 2 \times 2 \text{ m}^3$ . La précision du système permet d'identifier la position d'un marqueur à 2mm, comme mesuré dans [Della Croce et Cappozzo, 2000].

Avant de commencer une session de capture de mouvement, il est nécessaire, dans un premier temps, de calibrer les caméras et de placer les marqueurs sur le sujet suivant un protocole spécifique au système de capture.

#### L'étalonnage des caméras :

Une phase d'étalonnage des caméras de capture est nécessaire avant de commencer la session de capture. Cette phase consiste à identifier une relation entre les coordonnées des marqueurs dans le volume de travail et leur projection sur les caméras. Elle a comme intérêt de rendre possible le suivi des marqueurs et d'augmenter la précision de la reconstruction des trajectoires du mouvement.

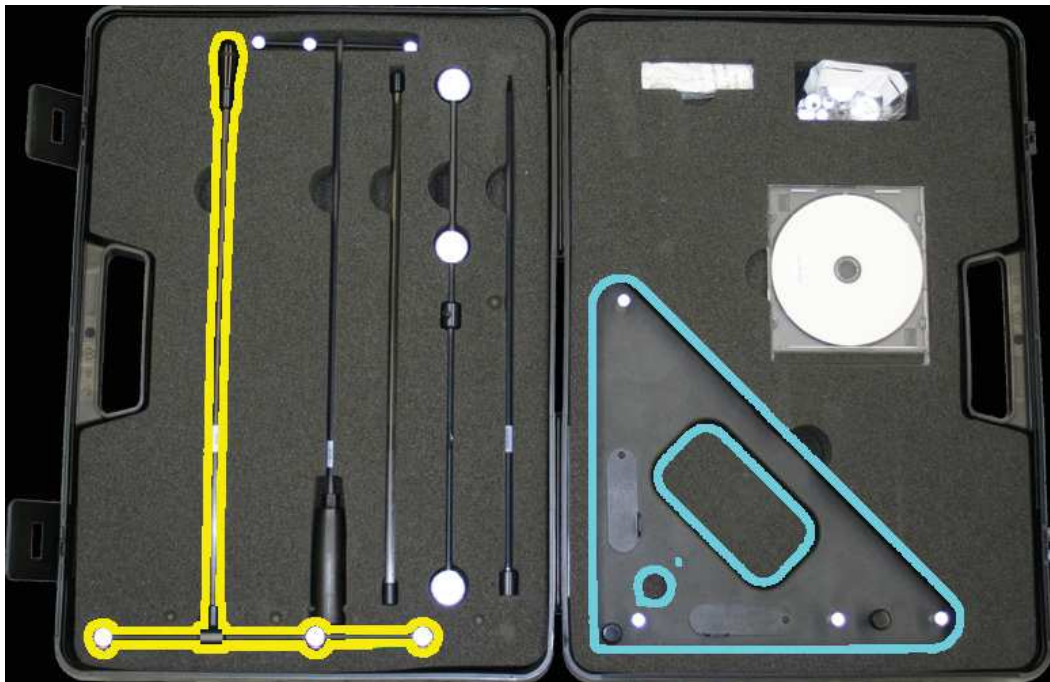


Figure 2.3: Vue de la valise de calibration Vicon®, elle contient (entre autres) la baguette (en jaune) et l'équerre (en bleu).



L'étalonnage est réalisé en balayant l'espace de capture avec une baguette en forme de T (en jaune sur la Figure 2.3) sur laquelle sont accrochés trois marqueurs réfléchissant pendant que les cameras filment la scène. Les dimensions exactes de la baguette étant connues par le logiciel, les relations géométriques entre les cameras (position et orientation) et les paramètres intrinsèque des caméras sont calculés. Le balayage doit être effectué dans tout l'espace de capture. L'évolution de l'étalonnage est indiqué sur l'écran de contrôle permettant de connaître en temps-réel les caméras qui ont des paramètres indéterminés ou avec une marge de confiance trop faible.

Au centre de l'espace de travail on dispose l'équerre en L (en bleu sur la Figure 2.3) pour situer l'origine et les directions des axes du mouvement capturé.

### **Placement des marqueurs :**

Le positionnement précis des marqueurs permet d'obtenir une bonne précision lors de la procédure de capture de mouvements. Les marqueurs doivent être soigneusement placés, selon le protocole choisi, à des endroits spécifiques précisés dans l'annexe A. La Figure A.1 indique le placement des marqueurs pour le protocole Plug-in-gait utilisé dans notre session d'expérimentations. Chaque marqueur correspond à une position sur le corps (label) afin qu'il soit reconnu par le logiciel Vicon Nexus de reconstruction des trajectoires. La fiabilité et la précision du protocole Plug-in-gait pour l'estimation des trajectoires du CoM pendant la marche a été démontrée en bio-mécanique pour des sujets sains dans [Gutierrez-Farewik *et al.*, 2006].

### **La session de capture :**

Suite à l'étalonnage des cameras et au placement des marqueurs, le sujet doit exécuter une posture d'initialisation. La posture consiste en une pose en T (bras tendus et maintenus à la hauteur des épaules) permettant de collecter les données anthropomorphiques. Le sujet peut ensuite effectuer les mouvements nécessaires selon les scénarios de l'étude pour enregistrer les données.

Le logiciel Vicon Nexus permet de visualiser la scène et d'enregistrer les sessions. Il est aussi utilisé pour lier les marqueurs à leurs labels afin d'obtenir une première visualisation comme illustré sur la capture d'écran de la Figure 2.4. Pendant la session d'expérimentation, il est possible de perdre la position de marqueurs à cause des occlusions. Pour une application hors-ligne, ceci peut être corrigé avec des méthodes d'interpolation 3D basé sur des splines, le suivi des autres marqueurs et la périodicité des mouvements.

Le logiciel Vicon Nexus permet aussi d'ajouter les informations venant des plateformes de mesures de forces présentées ci-après.

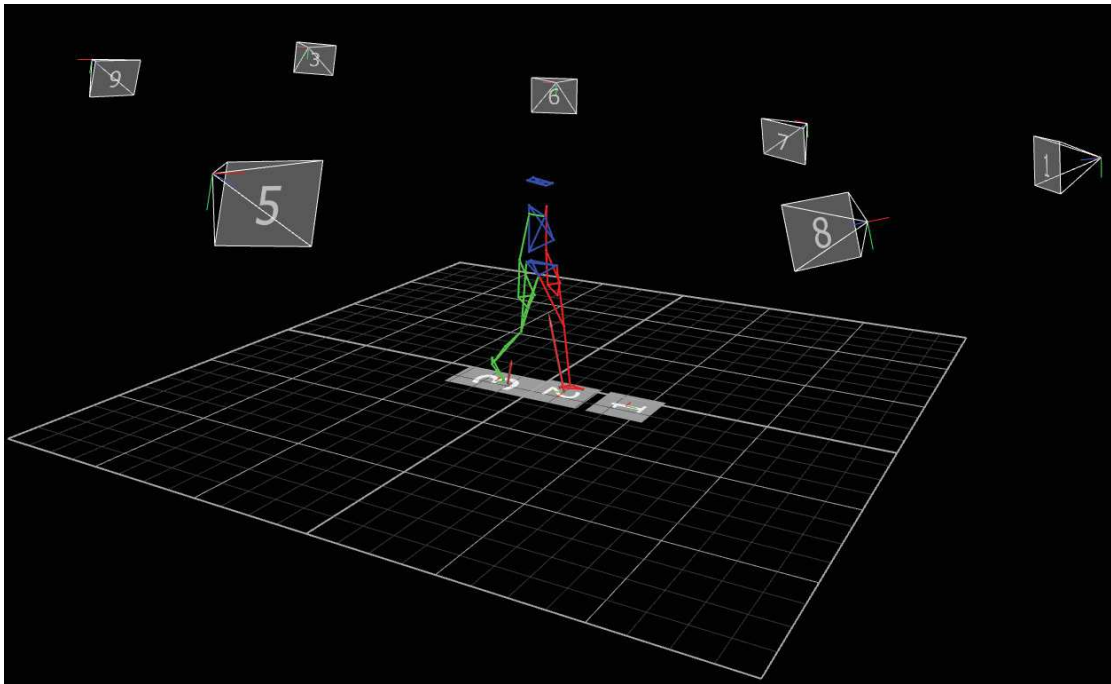


Figure 2.4: Visualisation de la scène d'expérimentation à l'aide du logiciel Vicon Nexus.

### 2.3.2.2 Les plate-formes de mesure de forces

Les plate-formes de mesure de forces sont des appareils de mesure permettant de quantifier la force qui leur est appliqué. Elles sont utilisées pour mesurer les forces réactionnelles générées par un corps se déplaçant dessus. Les plate-formes de forces utilisent des jauges de contrainte pour mesurer la force et le moment appliqués sur leur surface, comme illustré sur la Figure 2.5.

Le système de capture de mouvement du LABLAB est équipé de trois plate-formes de forces permettant de mesurer les forces de contact en six dimensions (forces et moments) à la fréquence d'enregistrement de 1000 Hz. Elles sont localisées dans le logiciel Vicon Nexus grâce au positionnement précis de l'équerre en L lors de la phase de calibration du système.

Le principal avantage de la plate-forme d'expérimentation du LABLAB est d'avoir trois plate-formes de force alignées sans espace entre elles. On peut donc réaliser une capture continue sans avoir besoin d'imposer au sujet les points de contact de ses pieds avec le sol, contrairement à la plupart des installations où le sujet doit viser les plate-formes de forces et ajuster sa longueur de pas [Pélissier et Boisson, 1994].

Ces plate-formes permettent l'enregistrement des forces de contact synchronisées avec

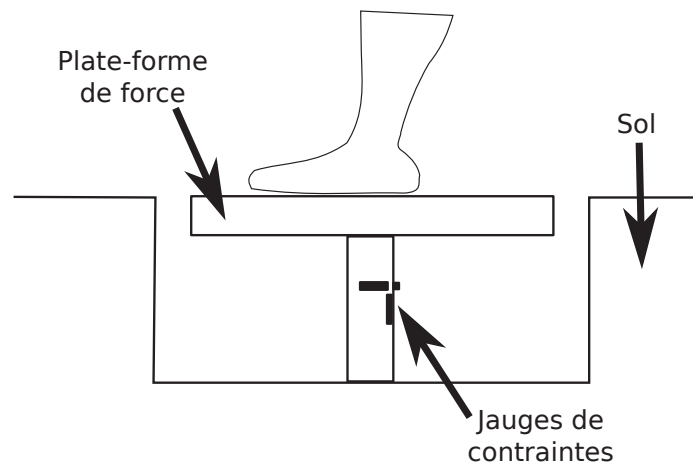


Figure 2.5: Principe de fonctionnement d'une plate-forme de force.

la mesure de la position des marqueurs dans le logiciel Vicon Nexus. Cette mesure est utilisée par la suite dans le logiciel LifeMOD présenté dans la section suivante.

### 2.3.2.3 Le logiciel LifeMOD

Le logiciel LifeMOD est utilisé pour estimer la position du CoM, les positions et les couples articulaires. La première étape pour estimer ces données est d'adapter le mouvement capturé sur une représentation géométrique du corps humain.

Le modèle humain est considéré comme un système rigide multi-corps simplifié avec 22 degrés de liberté (ddls). Ces degrés de liberté sont purement rotoïdes et distribués sur les différentes articulations comme le montre la Figure 2.6.

Chaque jambe est composée de six ddls, trois à la hanche, un ddl au genou et deux à la cheville. Le tronc et la tête sont composés de 2 ddls. Les bras sont composés de 3 ddls chacun, 2 ddls à l'épaule et un au coude. Les longueurs des membres sont mesurées sur les sujets et utilisées dans le modèle. Les poids, centre de masse et inertie de chaque segment sont calculés à partir des tables anthropomorphiques données par [De Leva, 1996].

Une fois le modèle géométrique choisi, on importe les marqueurs issus de Vicon Nexus dans LifeMOD. Lors de cette étape, les marqueurs capturés sont mis en correspondance avec le modèle simplifié comme illustré sur la Figure 2.7.

Le logiciel LifeMOD permet de faire une estimation de la cinématique du sujet où le mouvement du modèle suit les marqueurs capturés (cf. Figure 2.8). Pour faire correspondre le mouvement au plus près, le squelette est attaché aux marqueurs par des systèmes masse ressort amortisseur en trois dimensions au niveau de chaque marqueur. Ceci

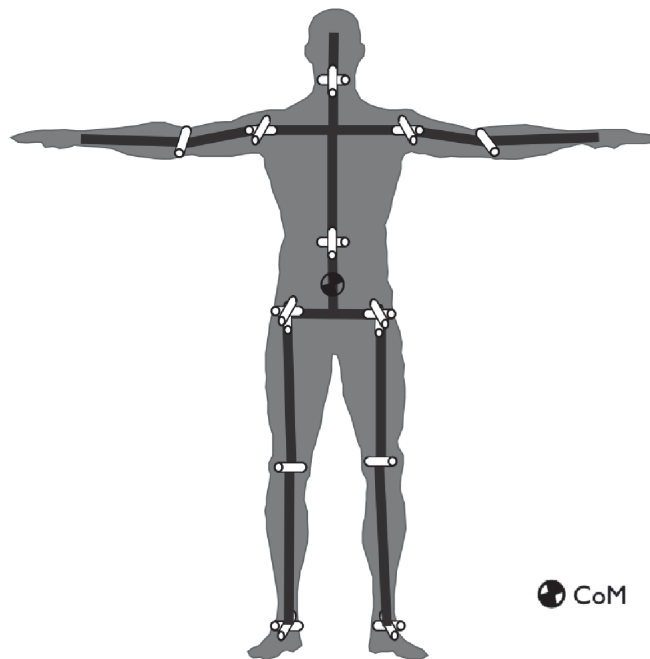


Figure 2.6: Illustration du modèle géométrique utilisé pour représenter le système locomoteur de l'humain (position des ddl).

permet déjà de trouver une bonne approximation de la trajectoire du CoM, des trajectoires des segments dans l'espace opérationnel et des trajectoires articulaires.

Le logiciel LifeMOD permet aussi de faire une estimation dynamique en prenant en compte les plate-formes de force comme le montre la Figure 2.9. Cette estimation dynamique permet de trouver les couples articulaires et d'affiner l'estimation des trajectoires articulaires et des trajectoires des segments dans l'espace opérationnel.

Le logiciel LifeMOD permet donc d'adapter le mouvement au modèle simplifié de la cinématique du sujet choisi, puis d'estimer les variables cinématiques et dynamiques des espaces articulaires et opérationnels.

Ce logiciel a été utilisé pour calculer ces variables sur les sujets présentés dans la section suivante.

### 2.3.3 Les sujets de l'étude

Quatorze volontaires ont participé à cette étude après avoir signé un formulaire de consentement éclairé. Les données anthropomorphiques ont été mesurées sur les sujets debouts et les mesures sont récapitulées dans le tableau 2.2.

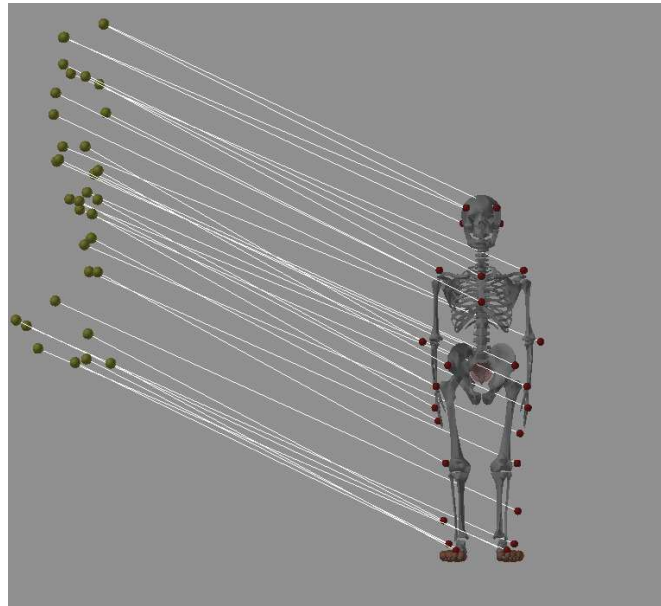


Figure 2.7: Importation des marqueurs dans le logiciel LifeMOD.

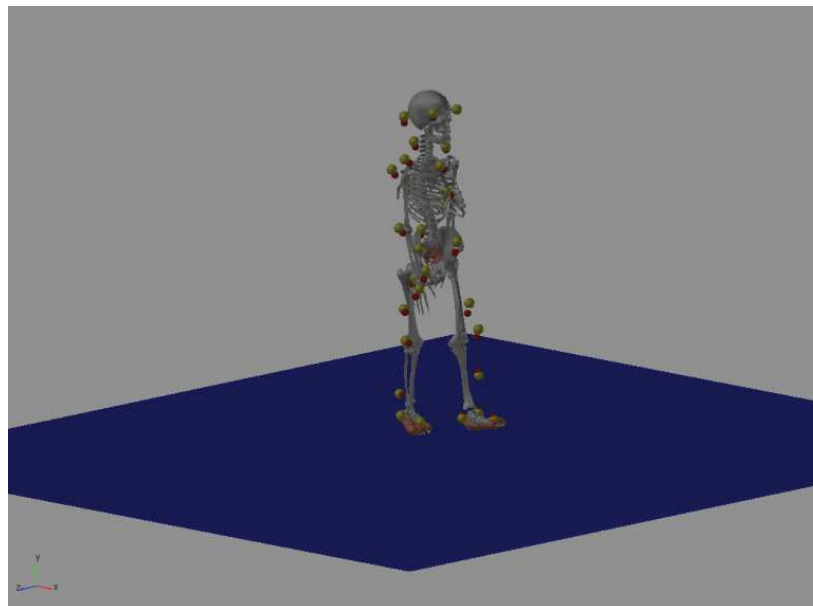


Figure 2.8: Estimation cinématique dans le logiciel LifeMOD (le mouvement est guidé par les marqueurs).

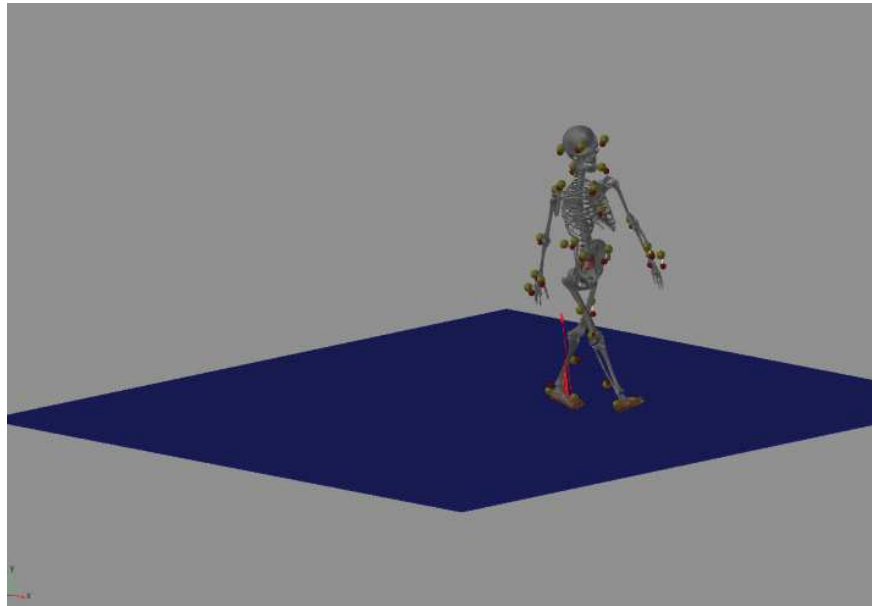


Figure 2.9: Estimation dynamique dans le logiciel LifeMOD (couple articulaire).

Ces sujets sont principalement de jeunes étudiants issus de la faculté de sport de Rome "Foro Italico" montrant un très bon niveau sportif et en bonne santé.

### 2.3.4 Résultats des expérimentations

Comme expliqué précédemment, nous avons enregistré le mouvement humain sur plusieurs sujets. Ces données ont été utilisées pour estimer les positions articulaires et des trajectoires dans l'espace opérationnel comme résumé sur la Figure 2.10.

L'étude de l'influence de l'amplitude du CoM, selon l'axe transversal et l'axe longitudinal a été utilisée pour créer une représentation graphique de la consommation énergétique pour plusieurs vitesse de marche. Une étude similaire a été réalisée par [Massaad *et al.*, 2007] pour déterminer le coût métabolique en fonction des amplitudes du CoM et de la vitesse de marche. Le coût métabolique n'étant pas significatif pour adapter le mouvement sur un robot humanoïde, le coût mécanique du mouvement a été utilisé pour la représentation graphique.

Lors de la création de cette carte de consommation énergétique au sens coût mécanique, il n'a pas été possible de montrer une correspondance entre les amplitudes du CoM, la vitesse de marche et la consommation énergétique. Il n'est pas apparu de correspondance formelle entre la consommation énergétique au sens coût mécanique et les amplitudes du CoM en fonction de la vitesse de marche. Cette idée de recherche prometteuse a

Tableau 2.2: Les données anthropomorphiques des sujets de l'étude

Sujet	Poids (Kg)	Taille (mm)	Distance InterAsis (mm)	Longueur jambe gauche (mm)	Longueur jambe droite (mm)
John	73.4	1747	254	935	984
Valerio	66.7	1647	261	867	924
Alessio	77.5	1649	262	832	898
Vincent	75.4	1749	311	893	949
Alberto	75.7	1883	326	984	1025
Vincent2	73.5	1852	375	976	1017
Giolle	91.9	1810	327	874	930
Ahmed	71.6	1724	258	857	934
Luca	83.7	1952	446	1015	1065
Alberto2	70.8	1735	298	955	909
Marco	96.3	1840	274	941	995
Cathy	58.8	1614	242	749	682
Leonardo	68.5	1717	229	884	927
Daniel	55.6	1626	294	779	827

été mise de côté afin de poursuivre ce travail de thèse dans une autre voie. Il serait intéressant d'utiliser d'autres fonctions de coût afin de trouver une correspondance permettant de choisir l'amplitude du CoM en fonction de la vitesse de marche pour les robots humanoïdes.

L'étude réalisée pour transposer le mouvement de l'humain sur un robot humanoïde nous a permis de réaliser l'importance de s'intéresser aux données minimales nécessaire pour reproduire la marche humaine. Cette direction a été favorisée dans la suite de cette étude. L'étude des données minimales pour reproduire le mouvement de marche humaine est présentée dans la section suivante.

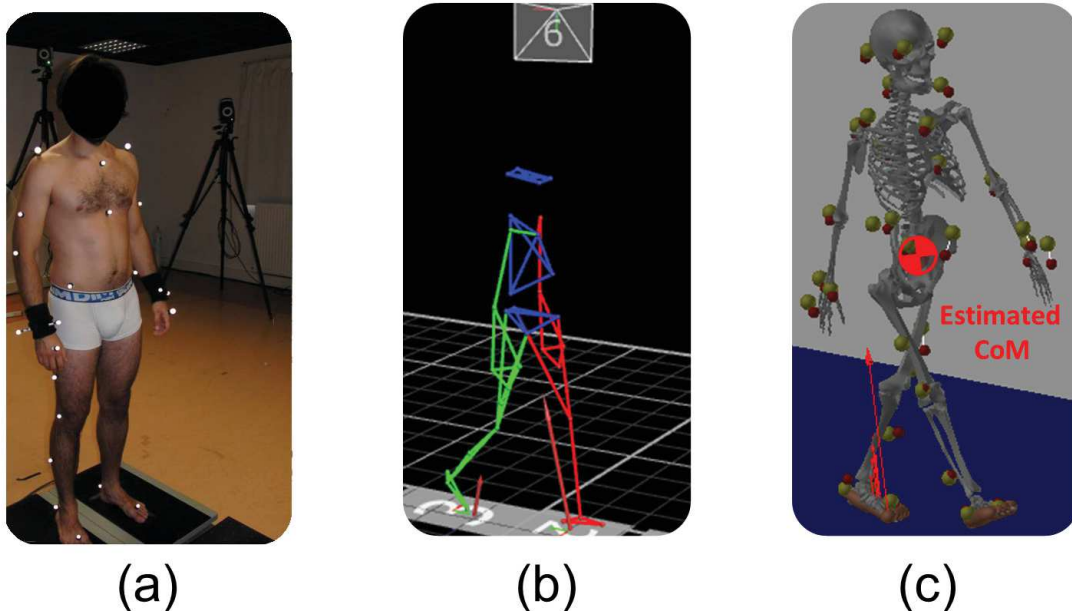


Figure 2.10: Principe de base de l'acquisition de données du mouvement humain. Un gabarit corps-complet composé de 35 marqueurs réfléchissants (a) a été utilisé pour suivre les déplacements de chaque membre. (b) Les marqueurs correspondants ont été appliqués sur un modèle géométrique spécifié (c) afin de permettre une estimation des positions et couples articulaires, des trajectoires des pieds ainsi que la trajectoire du centre de masse.

## 2.4 Données minimales pour la reproduction du mouvement

Le but de cette étude étant de transposer la marche humaine sur des robots humanoïdes, il est naturel de se demander quelles sont les principales caractéristiques de la marche humaine. Une observation attentive du mouvement humain nous a permis d'identifier deux composantes clé de la marche :

- la pose relative des pieds, et
- la position du centre de masse.

Ces composantes vont être analysées comme étant des objectifs à suivre et sont détaillées ci-dessous.



### 2.4.1 Objectif 1 : Pose relative des pieds

La marche d'un sujet sain est déterminée par un cycle de marche répétitif. Ce cycle de marche peut être facilement observé au niveau des pieds. En effet, pendant la marche, un pied est placé devant l'autre de manière cyclique. Le premier des objectifs pour pouvoir reproduire la marche humaine est donc le positionnement (en position et orientation) d'un pied par rapport à l'autre comme illustré sur la Figure 2.11.

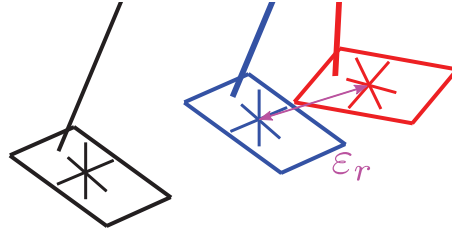


Figure 2.11: Illustration de l'erreur liée à la pose relative des pieds.

L'erreur de pose relative des pieds,  $\varepsilon_r \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$ , peut être définie de la manière suivante :

$$\varepsilon_r = [E_{\text{pos}}^T \ E_{\text{ori}}^T]^T \quad (2.4.1)$$

composé de l'erreur de position  $E_{\text{pos}} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$  et de l'erreur d'orientation  $E_{\text{ori}} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ .

L'erreur de position,  $E_{\text{pos}}$ , est calculée en prenant la différence entre la position désirée du pied gauche et la position calculée du pied gauche grâce au modèle géométrique direct (MGD). Ces deux positions sont exprimées dans le repère du pied de référence, le pied droit.

$$E_{\text{pos}} = P_{\text{rd}} - P_r \quad (2.4.2)$$

avec  $P_{\text{rd}} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$  la position désirée du pied et  $P_r \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$  la position calculée avec le MGD.

L'erreur d'orientation,  $E_{\text{ori}}$ , est calculée en prenant la différence entre l'orientation désirée du pied gauche et l'orientation calculée du pied gauche grâce au MGD.

$$E_{\text{ori}} = R_{\text{rf}} (\ln(R_{\text{rf}}^{-1} R_{\text{lf}} R_{\text{rd}}))^{\vee} \quad (2.4.3)$$

avec  $R_{\text{rd}} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  la matrice d'orientation désirée du pied droit,  $R_{\text{lf}} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  la matrice d'orientation du pied gauche calculée avec le MGD et  $R_{\text{rf}} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  la matrice d'orientation du pied droit calculée avec le MGD.

L'opérateur  $\omega = (\ln(\bullet))^{\vee}$  est défini dans la section 1.4.2.4.

La matrice jacobienne, qui permet de passer de l'espace de l'erreur de pose relative des pieds à l'espace articulaire, permet d'exprimer la relation suivante :

$$\varepsilon_r = J_r \varepsilon_q \quad (2.4.4)$$

où  $\varepsilon_q \in \mathbb{R}^{n \times 1}$  représente le vecteur des erreurs de positions articulaires,  $J_r \in \mathbb{R}^{6 \times n}$  est la matrice jacobienne de la pose relative des pieds et  $n$  est le nombre de degrés de liberté du modèle humain ou robot humanoïde considéré.

### 2.4.2 Objectif 2 : Position du centre de masse

Le Centre de masse (CoM) est un indicateur de stabilité statique pour les robots humanoïdes (cf. section 1.4.2.2) dont le contrôle de la position a été largement abordé dans la littérature [Montecillo-Puente *et al.*, 2010; Cotton *et al.*, 2010; Sentis *et al.*, 2010]. L'objectif de positionnement du CoM est souvent utilisé pour permettre la génération de mouvements quasi-statiques stables. Cet objectif place la position du CoM dans l'espace opérationnel en trois dimensions comme illustré sur la Figure 2.12.

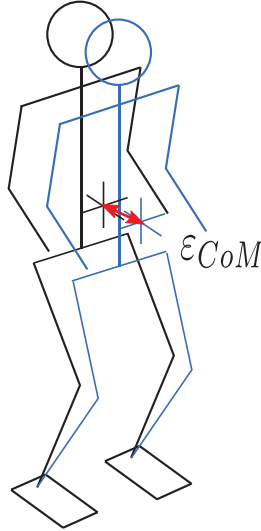


Figure 2.12: Illustration de l'erreur liée à la position du centre de masse.

L'erreur de position du CoM,  $\varepsilon_{\text{CoM}} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ , peut être formulée comme suit :

$$\varepsilon_{\text{CoM}} = \text{CoM}_d - \text{CoM} \quad (2.4.5)$$

où  $\text{CoM}_d = [x_{\text{CoM}_d} \ y_{\text{CoM}_d} \ z_{\text{CoM}_d}]^T$  est la position désirée du CoM et  $\text{CoM} = [x_{\text{CoM}} \ y_{\text{CoM}} \ z_{\text{CoM}}]^T$  est la position du CoM obtenue grâce au modèle géométrique direct du CoM.

Les positions  $\text{CoM}_d$  et  $\text{CoM}$  doivent être définies dans le même système de coordonnées. Nous proposons d'utiliser les coordonnées du pied droit comme coordonnées de référence. De cette manière, les coordonnées sont définies dans un repère local contrairement aux repères globaux utilisés communément, nécessitant la connaissance de la posi-

tion précise du robot dans son environnement. Ce choix permet de générer des trajectoires cycliques de la position désirée du CoM dans le cas de la marche.

La matrice jacobienne qui permet de passer de l'espace de l'erreur de position du CoM à l'espace articulaire permet d'exprimer la relation suivante :

$$\varepsilon_{\text{CoM}} = J_{\text{CoM}} \varepsilon_q \quad (2.4.6)$$

où  $J_{\text{CoM}} \in \mathbb{R}^{3 \times n}$  est la matrice jacobienne de la position du CoM.

### 2.4.3 Illustration des deux objectifs sur les données de l'humain

Les deux objectifs précédents ont été utilisés pour suivre les données de capture du mouvement afin de reproduire la marche humaine sur un robot humanoïde. Pour suivre ces objectifs, on a utilisé le formalisme de tâches [Siciliano et Slotine, 1991; Nakamura *et al.*, 1987] présenté en détail dans le chapitre 3. La loi de contrôle minimale pour suivre ces deux objectifs est donnée par :

$$\varepsilon_q = J_r^+ \varepsilon_r + (J_{\text{CoM}}(\mathbb{I} - J_r^+ J_r))^+ (\varepsilon_{\text{CoM}} - J_{\text{CoM}} J_r^+ \varepsilon_r) \quad (2.4.7)$$

où  $\mathbb{I}$  est la matrice identité et  $J^+$  est la pseudo-inverse de Moore-Penrose [Moore, 1920; Penrose, 1955] de la matrice  $J$ .

Cette commande minimale pour deux objectifs peut être résumée par le schéma-bloc de la Figure 2.13.

A travers cette présentation et ce schéma-bloc, l'idée consiste à illustrer le principe de base de la loi de contrôle sur un cas de figure avec deux objectifs uniquement. Cependant, l'approche est générique et s'applique facilement à d'autres cas avec plusieurs objectifs. Elle est présentée en détail dans le chapitre 3.

La loi de commande est alors utilisée avec le modèle simplifié de la cinématique de l'humain disposant de 22 ddls présenté dans la section 2.3.2.3.

Le scénario considéré est celui d'une marche à vitesse normale de trois pas enregistrée au LABLAB. En utilisant les données issues de la capture du mouvement comme trajectoire de référence pour la position du CoM et la pose relative des pieds, on obtient un mouvement peu naturel comme dans l'illustration de la Figure 2.14.

Sur cette figure, on peut voir que les deux bras du modèle humain sont très relevés et que le buste bouge beaucoup pendant la marche pour satisfaire l'objectif du CoM. De plus les jambes sont souvent tendues, en position singulières, rendant difficile le contrôle cinématique du modèle.

Des ddls sont fortement sollicités, comme les articulations du buste par exemple, créant ainsi de grandes vitesses articulaires pendant de courtes durées (cf. les positions consécutives des figures 2.14 (e)-(f) par exemple).

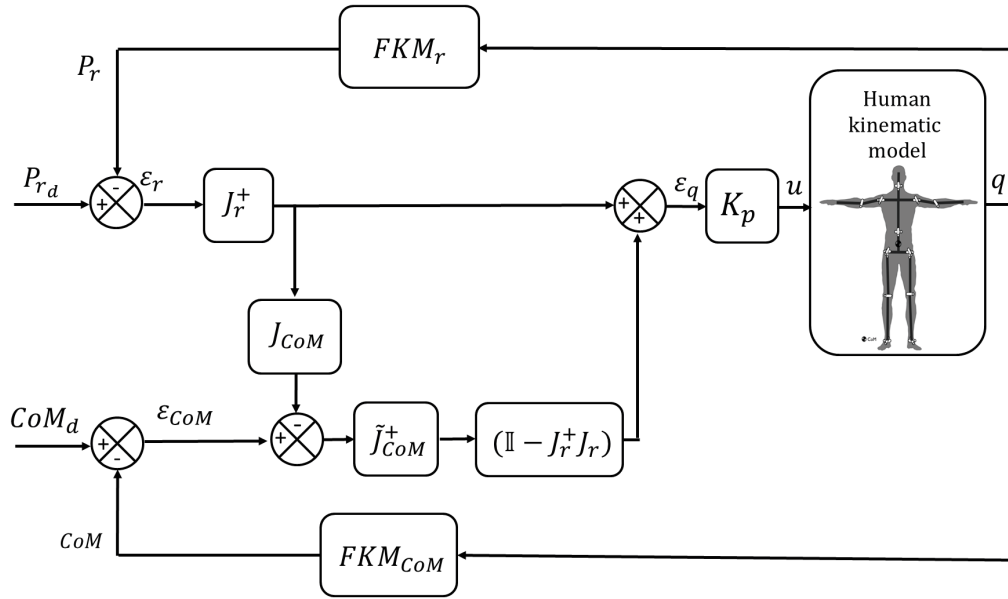


Figure 2.13: Schéma-bloc de la commande pour les deux objectifs.

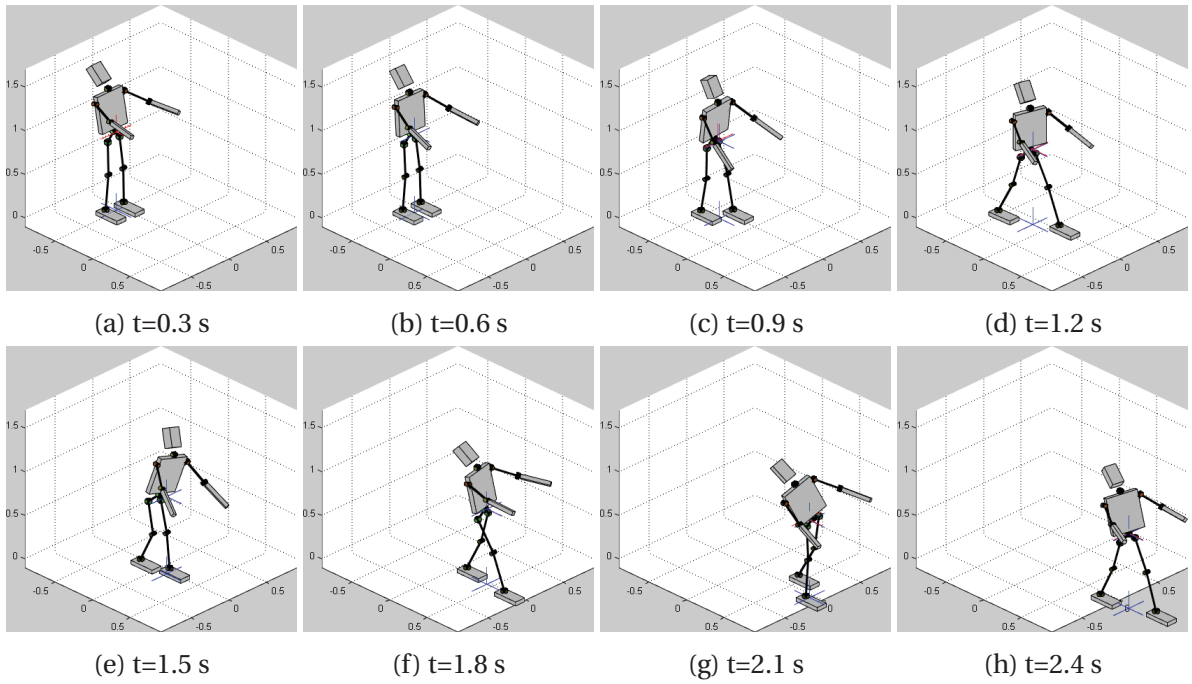


Figure 2.14: Application directe des trajectoires issues de la capture du mouvement.

Cela vient principalement du fait que le modèle humain est fortement simplifié par rapport au système locomoteur humain. En effet, ce modèle est constitué d'articulations rotoïde reliant des corps rigides alors que chez l'humain les articulations sont souvent de type sphérique et le corps humain est flexible. De plus, plusieurs articulations ne sont pas prises en compte dans le modèle considéré comme la flexibilité du pied par exemple. Ceci empêche de créer une marche ressemblant à la marche humaine.

La complexité du système locomoteur humain par rapport à celle d'un modèle impose d'adapter les données extraites de la capture du mouvement car une utilisation directe de ces données échoue. Pour cela, on propose d'ajuster la position verticale du CoM pour éviter les singularités dans le calcul du contrôle pendant la marche. Cette modification est faite en abaissant la position verticale du CoM uniformément sur la trajectoire du CoM de référence afin d'éliminer les erreurs de suivi de  $\varepsilon_r$  et  $\varepsilon_{CoM}$ .

La Figure 2.15 montre les résultats d'une simulation où les trajectoires de référence issues de la capture du mouvement ont été corrigées en abaissant la position verticale du CoM.

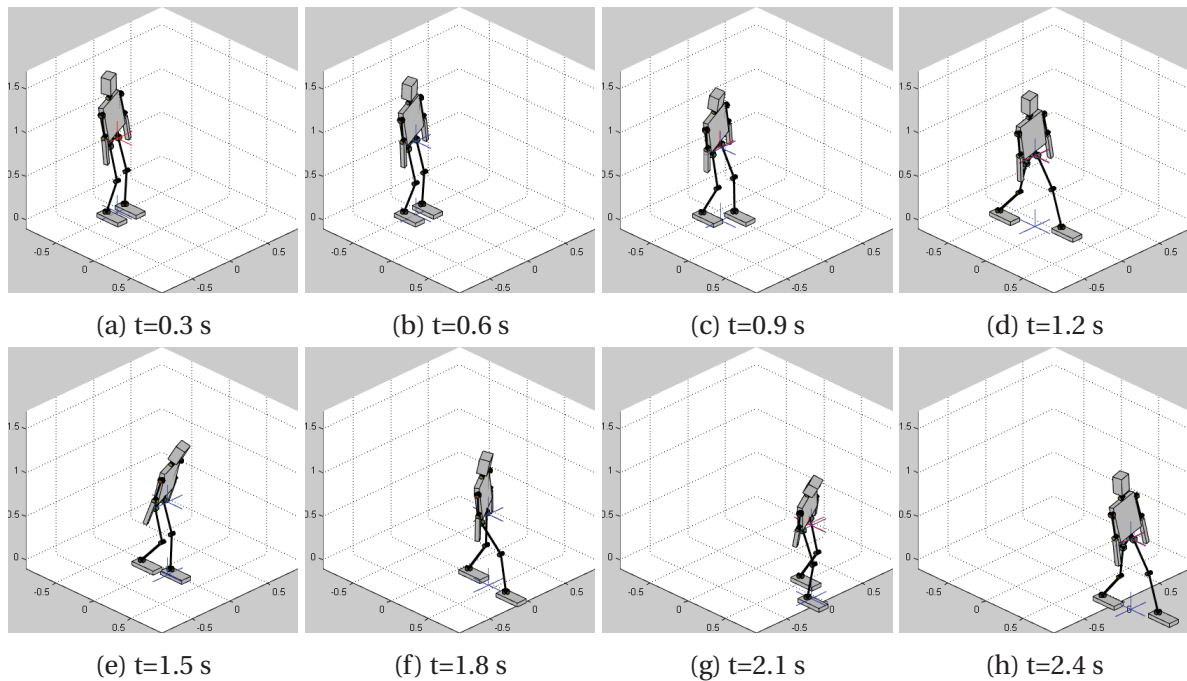


Figure 2.15: Application des trajectoires modifiées.

Lors de l'application des nouvelles trajectoires, les bras restent abaissés le long du corps pendant la marche. L'orientation du buste continue à présenter des rotations rapides. Les genoux ne sont plus en extension mais légèrement pliés évitant ainsi les singularités pen-

dant la marche. Cette approche permet de créer une marche plus naturelle et plus proche des mouvements humain qu'avant la modification de trajectoire.

Les trajectoires articulaires obtenues pour la jambe droite dans le plan sagittal sont tracées sur la Figure 2.16.

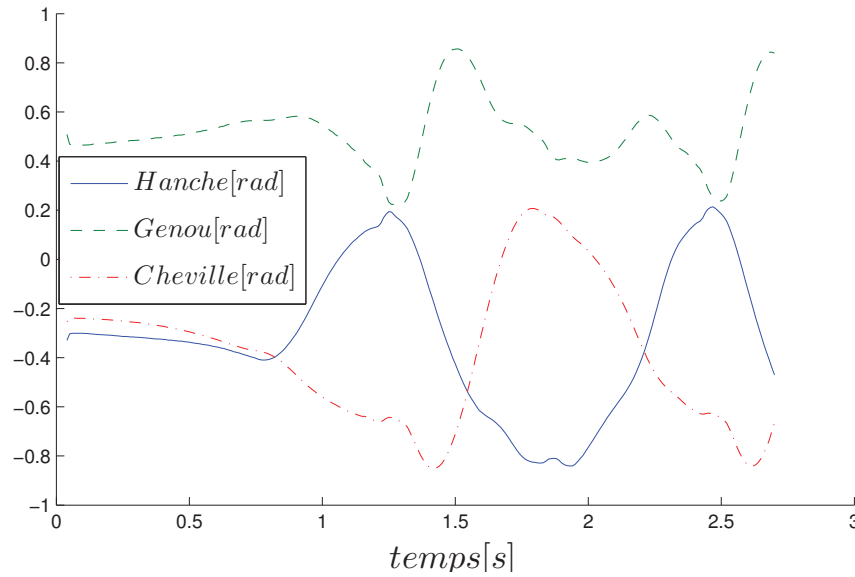


Figure 2.16: Trajectoires articulaires de la jambe droite dans le plan sagittal.

La trajectoire de référence de l'orientation du pied est fixée pour maintenir le pied parallèle au sol car le pied modélisé est considéré comme rigide. L'impact du pied en vol avec le sol se fait alors sur l'intégralité de la semelle et n'est pas limitée au talon comme dans la marche humaine. Cette contrainte modifie le comportement des articulations de la jambe et rend la comparaison avec les trajectoires de l'humain inefficace.

La position du pelvis dans l'espace Cartésien est très proche de celle mesurée sur l'humain comme représenté sur la Figure 2.17. La position du pelvis simulé est plus basse que celle mesurée sur l'humain par la capture du mouvement. Ceci est dû à la modification de la trajectoire de référence du CoM.

## 2.5 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'étude du mouvement humain. Nous avons présenté dans un premier temps des scénarios d'étude de la marche dans le but de transposer la marche humaine sur un robot humanoïde.

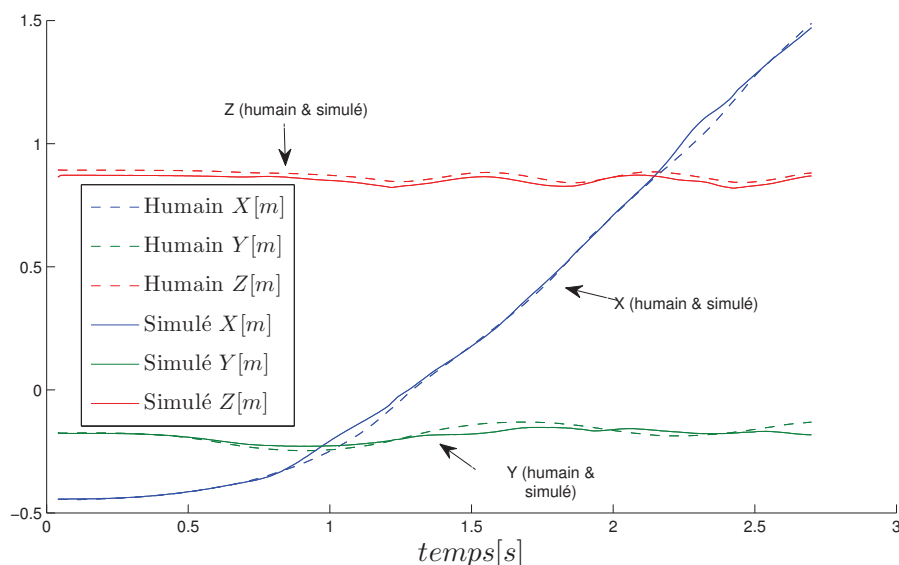


Figure 2.17: Position cartésienne du pelvis, où X, Y et Z représentent respectivement les axes antéro-postérieur, transversal et longitudinal.

Par la suite, nous avons présenté le laboratoire LABLAB où les expérimentations pour la capture du mouvement ont été réalisées. Nous avons aussi présenté le matériel nécessaire ainsi que les sujets de l'étude.

Pour finir, nous avons proposé une loi de commande utilisant deux objectifs pour imiter la marche humaine. Cette approche à deux objectifs permet d'imiter la forme globale de la marche, après des modifications sur les trajectoires, mais ne permet pas une adaptation sur un robot humanoïde. Les principales limitations pour transposer le mouvement obtenu sur un robot humanoïde sont le manque de prise en compte des butées articulaires et de la stabilité dynamique. En effet, ces deux critères sont nécessaire pour éviter la chute du robot du fait de sa dynamique très différente de celle d'un humain.

Le chapitre suivant présente l'architecture de commande proposée dans cette thèse et permettant de prendre en compte ces derniers points afin de créer une commande permettant la reproduction d'une marche humaine sur un robot humanoïde.

# Solution proposée : Architecture de commande hybride cinématique/dynamique

## Sommaire

2.1	Introduction . . . . .	29
2.2	Scénarios proposés pour l'étude de la marche . . . . .	30
2.3	Capture du mouvement : Du concept à l'expérimentation . . . . .	32
2.4	Données minimales pour la reproduction du mouvement . . . . .	43
2.5	Conclusion . . . . .	49

## 3.1 Introduction

Ce chapitre présente l'architecture de commande hybride cinématique/dynamique proposée. Cette architecture de commande permet la génération de mouvement corps-complets dynamiquement stables pour des robots humanoïdes.

Les principes de tâches et la création de lois de commande basée sur le formalisme de tâches sont présentés en premier. Les quatre objectifs cinématiques proposés comme tâches dans ce manuscrit sont ensuite introduits. Le chapitre continue en démontrant la nécessité de la stabilisation dynamique pour un robot et la solution proposée pour la régulation du Zero Moment Point (ZMP). L'architecture de commande hybride cinématique/dynamique est ensuite proposée, suivie d'une discussion sur ses propriétés pour finir.

Cette architecture de commande hybride cinématique/dynamique résultante sera ensuite utilisée pour contrôler des robots humanoïdes en simulation dans le chapitre 4 puis expérimentalement sur nos robots dans le chapitre 5.



## 3.2 Rappel de la commande cinématique à base de tâches

La commande des robots nécessite un modèle du robot pour pouvoir calculer les ordres à donner aux actionneurs pour produire un mouvement désiré.

Les principales modélisations des robots sont le modèle géométrique direct (MGD), le modèle géométrique inverse (MGI), le modèle cinématique direct (MCD), le modèle cinématique inverse (MCI), le modèle dynamique direct (MDD) et le modèle dynamique inverse (MDI).

**Le modèle géométrique direct (MGD).** Le MGD est l'ensemble des relations permettant de déterminer les positions cartésiennes des segments du robot dans l'espace opérationnel en fonction des variables articulaires. Il permet calculer la position des organes terminaux (mains, pieds, ...) à partir des positions des moteurs, comme illustré sur la Figure 3.1. Cette modélisation est principalement basée sur la trigonométrie et n'accepte qu'une solution.

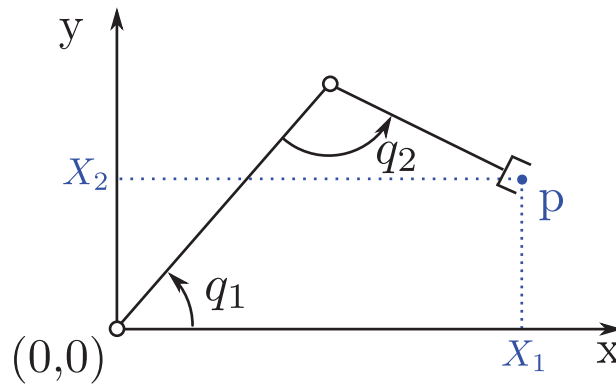


Figure 3.1: Le MGD permet de calculer les positions dans l'espace opérationnel  $[X_1, X_2]^T$  à partir des positions dans l'espace articulaire  $[q_1, q_2]^T$ .

Si l'on définit  $X = [X_1, X_2, \dots, X_{m-1}, X_m]^T$  le vecteur de  $m$  coordonnées opérationnelles, représentant des positions et orientations cartésiennes, et  $q = [q_1, q_2, \dots, q_{n-1}, q_n]^T$  le vecteur de variables articulaires de dimension  $n$  égale au nombre de degré de liberté (ddl); alors la modélisation par le MGD peut être représentée par l'équation suivante :

$$X = \text{MGD}(q) \quad (3.2.1)$$

**Le modèle géométrique inverse (MGI).** Le MGI est l'ensemble des relations permettant de déterminer les positions dans l'espace articulaire en fonction des positions cartésiennes désirées dans l'espace opérationnel, de calculer la position des moteurs nécessaire pour

placer les organes terminaux (mains, pieds, ...) à une position précise, comme illustré sur la Figure 3.2.

Cette modélisation peut admettre :

- une infinité de solutions si le robot est redondant ;
- un nombre limité de solutions comme illustré sur la Figure 3.2 ;
- aucune solution dans le cas où la position cartésienne demandée est en dehors de l'espace de travail, le cas où le robot est en posture singulière ou encore le cas où la pose demandée nécessite plus de ddl que ceux disponibles (on parle alors de sur-contrainte).

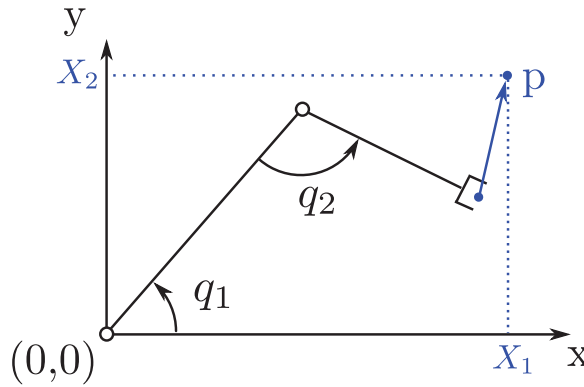


Figure 3.2: Le MGI permet de passer de l'espace opérationnel  $[X_1, X_2]^T$  à l'espace articulaire  $[q_1, q_2]^T$ .

La modélisation par le MGI peut être représentée par l'équation suivante :

$$q = \text{MGI}(X) \quad (3.2.2)$$

où  $X$  représente la position cartésienne et  $q$  représente les variables articulaires définies précédemment.

**Le modèle cinématique direct (MCD).** Le MCD permet d'exprimer les vitesses dans l'espace opérationnel en fonction des vitesses dans l'espace articulaire, de calculer la vitesse des organes terminaux à partir des vitesses des moteurs.

Si l'on définit  $\dot{X} = [\dot{X}_1, \dot{X}_2, \dots, \dot{X}_{m-1}, \dot{X}_m]^T$  le vecteur de dimension  $m$ , représentant des vitesses en translation et rotation dans l'espace opérationnel, et  $\dot{q} = [\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_{n-1}, \dot{q}_n]^T$

le vecteur de vitesses articulaires de dimension  $n$  ; alors la modélisation par le MCD peut être représentée par l'équation suivante :

$$\dot{X} = J(q)\dot{q} \quad (3.2.3)$$

avec  $J = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_1}{\partial q_1} & \dots & \frac{\partial x_1}{\partial q_m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial x_n}{\partial q_1} & \dots & \frac{\partial x_n}{\partial q_m} \end{bmatrix}$

où  $J$  est la jacobienne composée des dérivées partielles.

**Le modèle cinématique inverse (MCI).** Le MCI permet de déterminer les vitesses dans l'espace articulaire à partir des vitesses dans l'espace opérationnel, de calculer la vitesse des moteurs correspondant aux vitesses des organes terminaux.

La modélisation par le MCI peut être représentée par l'équation suivante :

$$\dot{q} = \text{MCI}(\dot{X}) \quad (3.2.4)$$

où  $\dot{X}$  représente les vitesses dans l'espace opérationnel et  $\dot{q}$  représente les vitesses articulaires définies précédemment.

**Le modèle dynamique direct (MDD).** Le MDD est l'ensemble des relations permettant de déterminer les accélérations dans l'espace articulaire en fonction des positions, vitesses et couples dans l'espace articulaire, de calculer le mouvement du robot en fonction des efforts appliqués sur les moteurs et de leur état actuel.

La modélisation par le MDD peut être représentée par l'équation suivante :

$$\ddot{q} = A(q)^{-1}(\tau - C(q, \dot{q})\dot{q} - G(q)) \quad (3.2.5)$$

où  $\tau = [\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{n-1}, \tau_n]^T$  de dimension  $n$  égale au nombre de ddl représente le vecteur des couples articulaires,  $A(q) \in \mathbb{R}^{n \times n}$  est la matrice d'inertie du robot,  $\ddot{q} \in \mathbb{R}^n$  représente le vecteur des accélérations articulaires,  $C(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$  est la matrice qui rassemble les effets centrifuges et les termes de Coriolis et  $G(q) \in \mathbb{R}^n$  est le vecteur de gravité.

**Le modèle dynamique inverse (MDI).** Le MDI permet de déterminer les couples dans l'espace articulaire à partir des positions, vitesses et accélérations dans l'espace articulaire, de calculer les efforts à appliquer sur les moteurs pour générer le mouvement désiré.

La modélisation par le MDI peut être représentée par l'équation suivante :

$$\tau = A(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) \quad (3.2.6)$$

Cette thèse porte sur l'utilisation du MCI avec plusieurs objectifs appliqués sur un robot humanoïde et l'amélioration dynamique de son équilibre en utilisant la commande cinématique.

Le MCI peut être formulé de plusieurs manières. L'une d'entre elles est appelée le formalisme de tâches. Le formalisme de tâches permet de calculer la commande des moteurs pour faire suivre des trajectoires à plusieurs organes terminaux (mains, pieds, etc) de manière indépendante.

### 3.2.1 Définition d'une tâche

Une fonction de tâche  $\mathcal{T}$  permet de représenter le passage de l'espace opérationnel à l'espace articulaire. L'espace articulaire est représenté par le vecteur des coordonnées généralisées  $q$  de taille égale au nombre de ddl et l'espace opérationnel est représenté par des vecteurs de positions et d'orientations cartésiennes  $X$  de l'organe terminal par exemple.

La relation entre les vitesses dans l'espace articulaire et l'espace opérationnel est celle du MCD, décrite dans l'équation (3.2.3).

Si l'on considère la tâche comme l'erreur entre un signal  $e$  et sa valeur désirée  $e_d$ , on obtient :

$$\varepsilon_e = e - e_d \quad (3.2.7)$$

La linéarisation permet l'approximation suivante :

$$\varepsilon_e = J_e \varepsilon_q \quad (3.2.8)$$

où  $J_e$  représente la jacobienne de la tâche,  $\varepsilon_e$  représente l'erreur de positionnement dans l'espace opérationnel et  $\varepsilon_q$  représente l'erreur de positionnement dans l'espace articulaire.

On peut donc relier un déplacement dans l'espace articulaire avec un déplacement dans l'espace opérationnel.

### 3.2.2 Cinématique inverse et noyau de la jacobienne

Dans la section précédente, la jacobienne de la tâche permet de passer de l'espace articulaire à l'espace opérationnel. La démarche contraire semble plus intéressante pour le contrôle des robots. En effet, cela permet de connaître quel déplacement effectuer sur les actionneurs pour se déplacer dans l'espace opérationnel afin de rejoindre une position désirée.

Pour cela, il faut inverser l'équation (3.2.8). La Jacobienne de tâche n'étant pas carrée, l'inversion utilise donc la pseudo-inverse.

La pseudo inverse  $A^+$  d'une matrice  $A$  est une inversion de matrice généralisée à des matrices non carrées [Moore, 1920; Penrose, 1955; Ben-Israel et Greville, 2003]. La matrice à inverser peut ne pas être une matrice carrée ou de rang plein.

La pseudo-inverse  $A^+ \in \mathbb{R}^{m \times n}$  de Moore-Penrose de la matrice  $A \in \mathbb{R}^{n \times m}$  est l'unique solution qui admet les propriétés suivantes :

$$AA^+A = A \quad (3.2.9)$$

$$A^+AA^+ = A^+ \quad (3.2.10)$$

$$(AA^+)^T = AA^+ \quad (3.2.11)$$

$$(A^+A)^T = A^+A \quad (3.2.12)$$

Elle se calcule de la manière suivante :

$$A^+ = (A^T A)^{-1} A^T \quad \text{si } (A^T A) \text{ est inversible} \quad (3.2.13)$$

$$A^+ = A^T (A A^T)^{-1} \quad \text{si } (A A^T) \text{ est inversible} \quad (3.2.14)$$

Si l'on utilise le pseudo-inverse de Moore-Penrose pour inverser l'équation (3.2.8), on obtient l'équation suivante :

$$\varepsilon_q = J_e^+ \varepsilon_e \quad (3.2.15)$$

Cette solution est la solution minimale au sens des moindres carrés. Cela signifie que la solution correspond à :

$$\min \|\varepsilon_e - J_e \varepsilon_q\| \quad (3.2.16)$$

où  $\|*\|$  représente la norme euclidienne de  $*$ . L'équation (3.2.15) implique que la solution minimise aussi  $\|\varepsilon_q\|$  parmi toutes les solutions possibles.

L'inversion de l'équation (3.2.8) peut être généralisée en utilisant le formalisme de gestion de la redondance [Siciliano et Slotine, 1991; Nakamura *et al.*, 1987] permettant une commande secondaire ( $Y$ ) :

$$\varepsilon_q = J_e^+ \varepsilon_e + (\mathbb{I} - J_e^+ J_e) Y \quad (3.2.17)$$

où  $\mathbb{I}$  est la matrice identité.

Cette solution est la forme générale des solutions au sens des moindres carrés. Cela signifie que l'équation (3.2.16) est encore respectée mais la solution ne minimise plus  $\|\varepsilon_q\|$ . Le terme  $\mathbb{I} - J_e^+ J_e$  est appelé projecteur orthogonal dans l'espace nul de  $J_e$  ; il permet d'ajouter une commande  $Y$  sans modifier l'asservissement de la première tâche  $\varepsilon_e$  car  $J_e^+$  et  $\mathbb{I} - J_e^+ J_e$  sont perpendiculaires entre eux [Nakamura *et al.*, 1987].

### 3.2.3 Formalisme pour la gestion de deux tâches hiérarchique

La loi de contrôle peut être étendue à plusieurs tâches en exploitant le projecteur orthogonal dans l'espace nul de  $J_e$ . Pour faire cohabiter plusieurs tâches, il est nécessaire de définir une hiérarchie ; de décider quelles tâches seront effectuées si elles ne peuvent pas être toutes réalisées.

Considérons deux tâches hiérarchiques :  $\mathcal{T}_1$  et  $\mathcal{T}_2$ . Les matrices Jacobiennes ( $J_{e1}, J_{e2}$ ) associés à ces tâches pour passer de l'espace articulaire ( $\varepsilon_q$ ) à l'espace de la tâche ( $\varepsilon_{e1}, \varepsilon_{e2}$ ) sont définies par :

$$\varepsilon_{e1} = J_{e1} \varepsilon_q \quad (3.2.18)$$

$$\varepsilon_{e2} = J_{e2} \varepsilon_q \quad (3.2.19)$$

Si on considère la cinématique inverse et le projecteur orthogonal dans l'espace nul pour la tâche  $\mathcal{T}_1$ , on obtient l'équation suivante :

$$\varepsilon_q = J_{e1}^+ \varepsilon_{e1} + (\mathbb{I} - J_{e1}^+ J_{e1}) Y \quad (3.2.20)$$

Pour simplifier, on change de variable pour indiquer le projecteur orthogonal dans l'espace nul :

$$P_1 = \mathbb{I} - J_{e1}^+ J_{e1} \quad (3.2.21)$$

Si on remplace  $\varepsilon_q$  de l'équation (3.2.19) par celui obtenu dans l'équation (3.2.20), on obtient :

$$\varepsilon_{e2} = J_{e2} \varepsilon_q = J_{e2} J_{e1}^+ \varepsilon_{e1} + J_{e2} P_1 Y \quad (3.2.22)$$

On identifie alors le vecteur de commande  $Y$  qui permet la réalisation de la tâche  $\mathcal{T}_2$  :

$$(J_{e2} P_1)^+ (\varepsilon_{e2} - J_{e2} J_{e1}^+ \varepsilon_{e1}) = Y \quad (3.2.23)$$

La loi de commande pour contrôler deux tâches hiérarchiques,  $\mathcal{T}_1$  et  $\mathcal{T}_2$ , s'écrit donc :

$$\varepsilon_q = J_{e1}^+ \varepsilon_{e1} + P_1 (J_{e2} P_1)^+ (\varepsilon_{e2} - J_{e2} J_{e1}^+ \varepsilon_{e1}) \quad (3.2.24)$$

Cette loi de commande peut être simplifiée comme cela a été démontré dans [Maciejewski et Klein, 1985] car l'opérateur de projection est hermitien et idempotent grâce à la simplification suivante :

$$B(AB)^+ = (AB)^+ \quad (3.2.25)$$

La loi de commande devient alors :

$$\varepsilon_q = J_{e1}^+ \varepsilon_{e1} + (J_{e2} P_1)^+ (\varepsilon_{e2} - J_{e2} J_{e1}^+ \varepsilon_{e1}) \quad (3.2.26)$$

Cette loi de commande permet de réaliser la commande principale et d'ajouter une tâche qui ne perturbera pas son asservissement grâce au projecteur en utilisant les ddl restés libres. On peut voir que la tâche  $\mathcal{T}_1$  est réalisée comme dans l'équation (3.2.18) et que la réalisation de la tâche  $\mathcal{T}_2$  est modifiée pour ne pas interagir avec l'exécution de la tâche  $\mathcal{T}_1$ .

### 3.2.4 Formalisme pour la gestion d'un nombre arbitraire de tâches hiérarchiques

Un formalisme de gestion d'un nombre arbitraire,  $n$ , de tâches hiérarchiques a été proposé dans [Siciliano et Slotine, 1991] pour générer une loi de commande en ajoutant les tâches récursivement. L'ordre des tâches dans la hiérarchie est défini par leur indice, la tâche  $\mathcal{T}_1$  étant la plus prioritaire et la tâche  $\mathcal{T}_n$  étant la dernière tâche à être considérée.

La loi de commande est construite en utilisant la loi récursive suivante :

$$\varepsilon_{q0} = 0 \quad (3.2.27)$$

$$\varepsilon_{qi} = \varepsilon_{qi-1} + (J_{ei} P_{i-1}^A)^+ (\varepsilon_{ei} - J_{ei} \varepsilon_{qi-1}) \quad (3.2.28)$$

où  $J_{ei}$  et  $\varepsilon_{ei}$  sont respectivement la Jacobienne et l'erreur liées à la tâche  $\mathcal{T}_i$  et  $P_{i-1}^A$  est le projecteur dans l'espace nul de la jacobienne augmentée  $J_i^A = (J_1, \dots, J_i)$ .

Ce projecteur peut être, lui aussi, construit récursivement comme proposé dans [Baerlocher et Boulic, 1998] :

$$P_0^A = \mathbb{I} \quad (3.2.29)$$

$$P_i^A = P_{i-1}^A - (J_{ei} P_{i-1}^A)^+ (J_{ei} P_{i-1}^A) \quad (3.2.30)$$

La loi de commande réalisant l'intégralité des tâches possibles est  $\varepsilon_{qn}$ .

### 3.3 Contrôle cinématique à base de quatre objectifs

Pour le contrôle des mouvements d'un robot humanoïde, on propose l'utilisation des quatre objectifs cinématiques.

Ces objectifs sont :

1. la pose relative des pieds définie dans la section 2.4.1 ;
2. la position du Centre de masse (CoM) définie dans la section 2.4.2 ;
3. l'orientation du buste ;
4. l'éloignement des butées articulaires.

L'application des données issues de la marche humaine sur une structure anthropomorphe a été présentée dans la section 2.4.3 en utilisant deux objectifs uniquement, à savoir la pose relative des pieds et la position du centre de masse.

Les deux autres objectifs ont été ajoutés pour permettre de contrôler des robots humanoïdes. En effet, lors de l'application de la commande avec les deux premières tâches uniquement sur un robot humanoïde, le robot peut générer des mouvements indésirables, voire dangereux pour le matériel comme illustré sur la Figure 3.3. Une infinité de configurations articulaires garantissent le respect des deux premières tâches, sans forcément produire une pose aisément réalisable par le robot. Les deux tâches présentées ci-après permettent d'éviter ces comportements.

#### 3.3.1 Objectif 3 : Orientation du buste

La stabilité de la marche est réalisée par les deux premiers objectifs, en revanche des objectifs fonctionnels ou esthétiques peuvent être ajoutés avec une priorité moindre.

L'objectif gérant l'orientation du buste sera utilisé pour maintenir le torse droit pour produire des mouvements plus naturels. Cet objectif sera modifié dans la section 3.5.3 pour produire des mouvements cohérents suivant l'inclinaison du sol.

L'erreur d'orientation du buste,  $\varepsilon_{ori} \in \mathbb{R}^3$ , peut être définie par :

$$\varepsilon_{ori} = R_{Ref} (\ln(R_{Ref}^{-1} R_{Body} R_{BodyDes}))^\vee \quad (3.3.1)$$



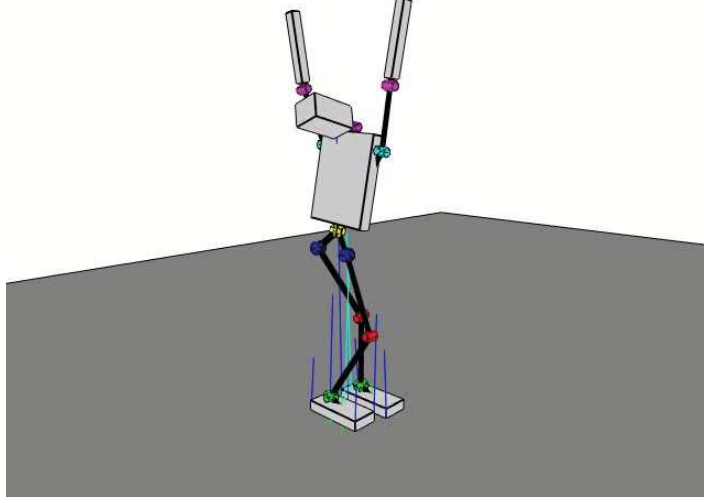


Figure 3.3: Illustration d'une posture parmi l'infinité possible respectant les deux premiers objectifs, la configuration articulaire contient des singularités au niveau des bras.

où  $R_{\text{BodyDes}} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  est la matrice de l'orientation désirée du buste,  $R_{\text{Ref}} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  et  $R_{\text{Body}} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  sont les matrices de l'orientation du pied droit et du buste respectivement.

Les orientations sont calculées dans les coordonnées du pied de référence, le pied droit, pour faciliter la génération de trajectoires.

La matrice jacobienne qui permet de passer de l'espace de l'erreur d'orientation du buste à l'espace articulaire permet de formuler la relation suivante :

$$\varepsilon_{\text{ori}} = J_{\text{ori}} \varepsilon_q \quad (3.3.2)$$

où  $J_{\text{ori}} \in \mathbb{R}^{3 \times n}$  est la matrice jacobienne de l'orientation du buste.

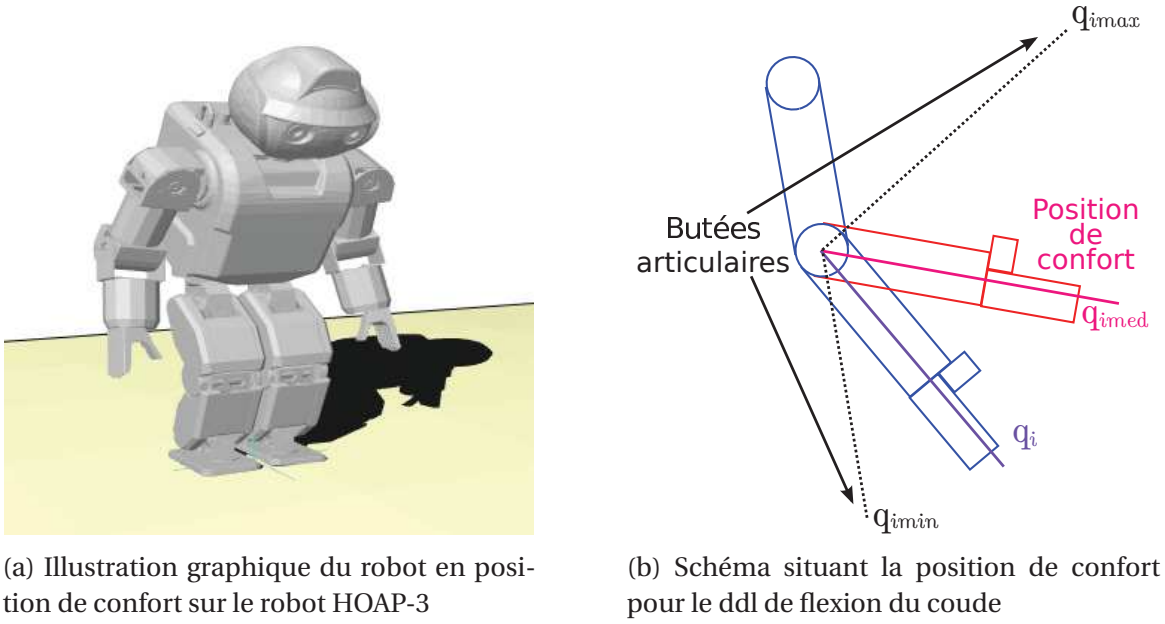
### 3.3.2 Objectif 4 : Éloignement des butées articulaires

Les objectifs précédents ont été conçus pour générer des mouvements corps-complet mais les configurations articulaires permettant de respecter tous les objectifs sont nombreuses. Il sera donc utile de contraindre les ddl restés libres pour converger vers une seule pose valide. Pour permettre une génération de mouvement stable, il est désirable que cette pose valide soit éloignée des butées articulaires.

Dans la littérature, plusieurs études ont proposé d'utiliser un objectif d'évitement des butées articulaires [Mezouar et Chaumette, 2002; Mohan *et al.*, 2009]. Cet objectif permet d'éviter la dérive articulaire pouvant survenir lorsque tous les objectifs précédents sont

respectés et que certains ddl sont laissés libres. Cet objectif permet également de garder les articulations du robot loin des butées articulaires. Ceci permet d'éviter une posture où une articulation est en butée, qui entraînerait une perte de ddl et rendrait le contrôle du robot plus difficile.

L'objectif d'éloignement des butées articulaires est basé sur des bassins d'attraction qui permettent de définir une position de confort (cf. Figure 3.4) [Liegeois, 1977].



(a) Illustration graphique du robot en position de confort sur le robot HOAP-3

(b) Schéma situant la position de confort pour le ddl de flexion du coude

Figure 3.4: La position de confort est définie comme la pose où les positions articulaires sont le plus loin possible de leurs limites.

La position de confort est définie comme étant la pose du robot où les articulations sont le plus loin de leur butées articulaires.

Les bassins d'attraction sont définis par :

$$\varepsilon_{\text{Joints}} = \beta [\varepsilon_{q_1} \ \varepsilon_{q_2} \ \varepsilon_{q_3} \ \dots \ \varepsilon_{q_n}]^T \quad (3.3.3)$$

avec :

$$\varepsilon_{q_i} = \frac{2 (q_i - q_{imed})}{(q_{imax} - q_{imin})^2} \quad ; \quad q_{imed} = \frac{q_{imax} + q_{imin}}{2} \quad (3.3.4)$$

où  $\beta \in \mathbb{R}_+^*$  est le gain de convergence,  $q_{i\max}$  et  $q_{i\min}$  sont respectivement les butées hautes et basses de l'articulation  $i$ ,  $q_i$  est la position courante de l'articulation  $i$  et  $q_{imed}$  sa position de confort.

L'utilisation simultanée de ces objectifs permet de créer un mouvement corps-complet. La pile de tâches du contrôle cinématique résultante est illustrée sur la Figure 3.5.

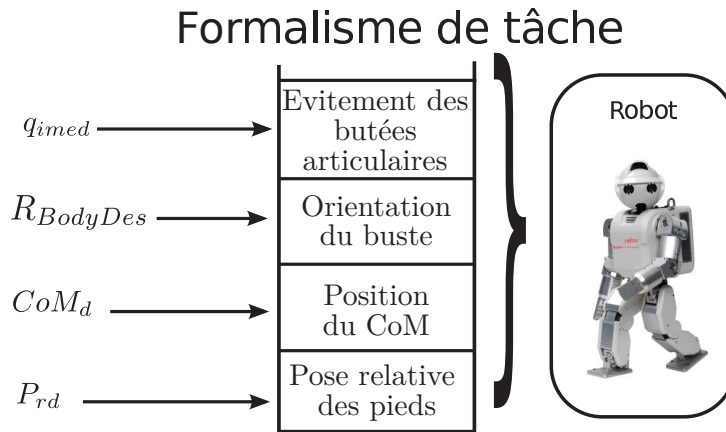


Figure 3.5: Contrôle cinématique basé sur la hiérarchie d'objectifs.

Cette pile de tâches ne permet pas de garantir la stabilité du robot car aucun retour n'est fait sur une indication de la stabilité. Pour améliorer la stabilité, il faut prendre en compte un indicateur de stabilité dynamique, ceci sera l'objet de la prochaine section.

### 3.4 Nécessité d'une gestion de l'équilibre dynamique

Dans le cadre de la création d'une architecture de commande, une gestion de l'équilibre, tant postural que dynamique (pour la marche par exemple) est nécessaire. Cette gestion, souvent appelée stabilisateur, permet de réaliser des mouvements stables. Les stabilisateurs sont souvent basés sur l'utilisation de la mesure du ZMP pour estimer le degré de stabilité du robot.

Dans la littérature, le problème de stabilisateur a été abordé de plusieurs manières. Une des principales approches utilise le modèle de pendule inversé linéaire 3D (3DLIPM) [Kajita *et al.*, 2001b; Tang et Er, 2007; Kajita *et al.*, 2001a; Feng et Sun, 2008] qui réduit la complexité de la dynamique du robot en le considérant comme une masse ponctuelle et des jambes de poids négligeable.

En simplifiant la dynamique, la relation entre le CoM et le ZMP est approximée à l'aide d'une équation différentielle du second ordre qui peut être régulée avec des techniques

classique de commande. La dynamique du robot est approximée par celle d'un pendule inversé, constitué d'une masse ponctuelle et d'une jambe de support télescopique reliée au sol par une articulation sphérique.

L'erreur induite par la simplification de la dynamique peut être corrigée en utilisant le contrôle par prédiction proposée par [Kajita *et al.*, 2003].

Ces approches sont très limitées car une des hypothèses de départ est que le sol est rigoureusement plat, sans obstacles. Si cette hypothèse permet de simplifier le problème de la stabilisation, elle limite aussi son champ d'action.

D'autres approches proposées sont basées sur la régulation du ZMP [Huang et Nakamura, 2005; Kim *et al.*, 2006]. La régulation peut être dès lors appliquée à plusieurs niveaux, soit pour modifier le couple articulaire de la cheville [Hirai *et al.*, 1998; Buschmann *et al.*, 2009; Cho *et al.*, 2011], soit le moment angulaire de la hanche [Lee et Goswami, 2010; Stephens, 2011], soit modifier la trajectoire du centre de masse [Choi *et al.*, 2004, 2006] ou encore prendre la décision de faire un pas pour rétablir la stabilité [Lee *et al.*, 2008; Yi *et al.*, 2011]. La régulation peut aussi être appliquée sur le corps-complet [Lee et Goswami, 2010].

Certaines approches utilisent plusieurs lois de commande en fonction du retour des capteurs comme dans [Huang et Nakamura, 2005; Sugihara et Nakamura, 2002].

Ces approches sont très réactives et peuvent être robustes face à de grosses perturbations. Cependant, elles peuvent être difficiles à incorporer dans des lois de commande permettant d'utiliser le reste du corps du robot pour accomplir d'autres tâches utiles.

### 3.5 Un stabilisateur dynamique basé sur la mesure du ZMP

Pour stabiliser le robot, nous proposons plusieurs approches qui projettent la régulation du ZMP dans l'espace de régulation de l'erreur du CoM.

Les solutions proposées se basent tour à tour sur un contrôleur PD, un contrôleur PID non linéaire et un contrôleur PID non linéaire avec la projection sphérique de la régulation du contrôleur PID non linéaire.

Les solutions proposées sont illustrées dans le tableau 3.1.

où X signifie implémenté et 0 signifie non-implémenté.

La projection sphérique de la régulation du contrôleur PD n'a pas été implémentée car le contrôleur PD n'est pas robuste à des perturbation persistantes donc la projection sphérique n'apporte aucune amélioration. Les solutions proposées sont décrites ci-après.

Tableau 3.1: Solutions proposées pour le stabilisateur dynamique.

		Contrôleur	
		PD	PID non linéaire
Projection	Planaire	X	X
	Spherique	0	X

### 3.5.1 Régulation du ZMP par un contrôleur PD

Pour améliorer la stabilité dynamique du robot, nous avons créé une régulation du ZMP. Cette régulation est basée sur un calcul d'une distribution pondérée des erreurs du ZMP pour chaque pied.

L'erreur du ZMP,  $\varepsilon_{ZMP}$ , est calculée de la manière suivante :

$$\varepsilon_{ZMP} = \alpha \, dZMP_l + (1 - \alpha) \, dZMP_r \quad (3.5.1)$$

$$\alpha = \frac{AZMP_r}{AZMP_l + AZMP_r} \quad (3.5.2)$$

$$dZMP_l = ZMP_{ld} - ZMP_{lm} \quad (3.5.3)$$

$$dZMP_r = ZMP_{rd} - ZMP_{rm} \quad (3.5.4)$$

où  $AZMP_l$  et  $AZMP_r$  représentent les amplitudes des forces appliquées respectivement sur le pied droit et gauche mesurées par les capteurs de forces.  $ZMP_{ld} \in \mathbb{R}^{2 \times 1}$  et  $ZMP_{rd} \in \mathbb{R}^{2 \times 1}$  représentent les positions cartésiennes désirées du Zero Moment Point (ZMP) sous le pied droit et le pied gauche respectivement.  $ZMP_{lm} \in \mathbb{R}^{2 \times 1}$  et  $ZMP_{rm} \in \mathbb{R}^{2 \times 1}$  Représentent les positions cartésiennes mesurées du Zero Moment Point (ZMP), sous le pied droit et le pied gauche respectivement.  $dZMP_l$  et  $dZMP_r$  sont illustrés sur la Figure 3.6.

Les positions désirées du Zero Moment Point (ZMP) sont positionnées au centre de chaque pied ( $x_{ZMP_d} = 0$ ;  $y_{ZMP_d} = 0$ ) afin de permettre la régulation du ZMP sans avoir à calculer une trajectoire compliquée du ZMP.

Dans l'équation (3.5.1), L'erreur de suivi du ZMP  $\varepsilon_{ZMP}$  est une distribution pondérée de l'erreur du Zero Moment Point (ZMP) sous chaque pied. Les poids de cette distribution sont basés sur la répartition de l'amplitude des forces sur chaque pied comme défini dans l'équation (3.5.2). Cette répartition permet d'améliorer la stabilité dynamique quand le robot est sur ses deux pieds, en prenant l'erreur du Zero Moment Point (ZMP) de chaque

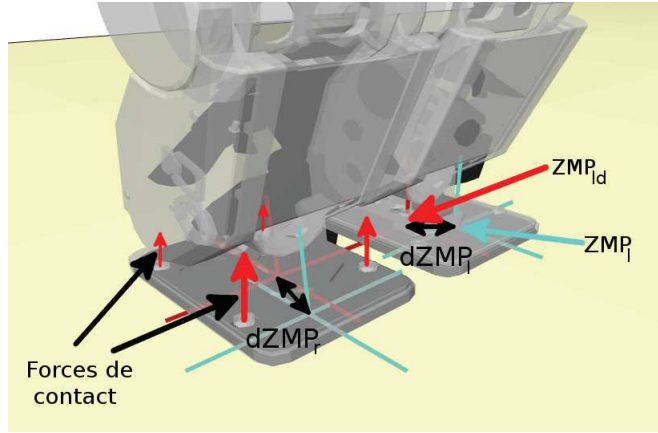


Figure 3.6: Illustration graphique des erreurs de suivi de la position du ZMP.

pied. La jambe qui supporte le plus de poids a le plus d'influence dans la régulation de la stabilité permettant un contrôle précis. Cependant, quand le robot est sur un pied, les erreurs du Zero Moment Point (ZMP) du pied de vol sont négligées et seules les erreurs du Zero Moment Point (ZMP) du pied en contact sont régulés.

Dans un premier lieu, une régulation du ZMP basée sur un contrôleur proportionnel dérivé (PD) a été proposée pour améliorer la stabilité du robot. Le contrôleur PD peut être formulé de la manière suivante :

$$u_{ZMP} = k_p \varepsilon_{ZMP} + k_d \dot{\varepsilon}_{ZMP} \quad (3.5.5)$$

La loi corrective ainsi obtenue est projetée dans l'espace de la tâche de régulation du CoM :

$$\varepsilon_{CZ} = \varepsilon_{CoM} + u_{ZMP} \quad (3.5.6)$$

où  $\varepsilon_{CZ}$  est l'objectif lié à la stabilité contenant la poursuite de la trajectoire du CoM ainsi que la régulation de l'erreur du ZMP ; et  $\varepsilon_{CoM}$  l'erreur de poursuite du CoM.

Cette approche permet d'améliorer la stabilité mais reste limitée à un faible domaine d'action. C'est pourquoi un contrôleur basé sur une correction proportionnelle intégrale dérivée (PID) non linéaire a été développé. Ce contrôleur sera présenté ci-après.

### 3.5.2 Régulation du ZMP par un contrôleur PID non linéaire

La solution proposée basée sur le contrôleur PD n'étant pas apte à compenser des perturbations de large amplitude ou de longue durée du ZMP, une solution basée sur un contrôleur non linéaire a été proposée.

Le contrôleur proposé est un proportionnelle intégrale dérivée (PID) non linéaire. Ce choix a été fait car le PID non linéaire a déjà été utilisé en robotique et améliore les performances des systèmes asservis avec une efficacité plus grande que celle d'un contrôleur PID classique [Xu *et al.*, 1995; Seraji, 1998; Su *et al.*, 2005; Shang et Cong, 2009]. Les principaux avantages de ce contrôleur est qu'il permet d'augmenter la rapidité de la réponse du système tout en augmentant l'amortissement et en améliorant la stabilité. Ceci est rendu possible grâce aux gains variables en fonction de l'erreur de position et de vitesse.

Le PID non linéaire appliqué sur l'erreur du ZMP peut prendre la forme suivante :

$$u_{ZMP} = k_p(\varepsilon_{ZMP})\varepsilon_{ZMP} + k_d(\varepsilon_{ZMP})\dot{\varepsilon}_{ZMP} + k_i \int \varepsilon_{ZMP} \quad (3.5.7)$$

où  $k_p(\varepsilon_{ZMP})$  et  $k_d(\varepsilon_{ZMP})$  sont respectivement le gain non linéaire proportionnel et dérivé ;  $k_i$  est un gain intégral fixe.

Le gain proportionnel non linéaire peut être écrit de la manière suivante :

$$k_p(\varepsilon_{ZMP}) = \begin{cases} k_p|\varepsilon_{ZMP}|^{\alpha_1-1}, & |\varepsilon_{ZMP}| > \delta_1, \\ k_p\delta_1^{\alpha_1-1}, & |\varepsilon_{ZMP}| \leq \delta_1. \end{cases} \quad (3.5.8)$$

où  $\alpha_1$  est un paramètre de réglage de la non linéarité et  $\delta_1$  son seuil d'activation. Nous utilisons le réglage  $\alpha_1 \in [0.5, 1.0]$  afin de tirer avantage du gain non linéaire comme proposé dans [Shang et Cong, 2009].

L'allure générale du gain proportionnel pour  $\alpha_1 = 0.75$  est illustrée sur la Figure 3.7.

Le gain dérivé non linéaire peut être écrit de la manière suivante :

$$k_d(\dot{\varepsilon}_{ZMP}) = \begin{cases} k_d|\dot{\varepsilon}_{ZMP}|^{\alpha_2-1}, & |\dot{\varepsilon}_{ZMP}| > \delta_2, \\ k_d\delta_2^{\alpha_2-1}, & |\dot{\varepsilon}_{ZMP}| \leq \delta_2. \end{cases} \quad (3.5.9)$$

où  $\alpha_2$  est un paramètre de réglage de la non linéarité et  $\delta_2$  son seuil d'activation. Nous utilisons le réglage  $\alpha_2 \in [1.0, 1.5]$  afin de tirer avantage du gain non linéaire.

L'allure générale du gain dérivé pour  $\alpha_2 = 1.25$  est illustrée sur la Figure 3.8.

Pour de faibles erreurs de position, le gain proportionnel est fixe, se comportant comme une correction proportionnelle classique. Quand l'erreur de position est grande, le gain diminue. En effet, la correction en position doit être importante si l'erreur est faible pour améliorer la rapidité et la précision ; en revanche, si l'erreur de position est grande, la diminution du gain évite l'instabilité du système.

Pour de faibles erreurs de vitesse, le gain dérivé est fixe, se comportant comme une correction dérivée classique. Quand l'erreur de vitesse est grande, le gain augmente. En

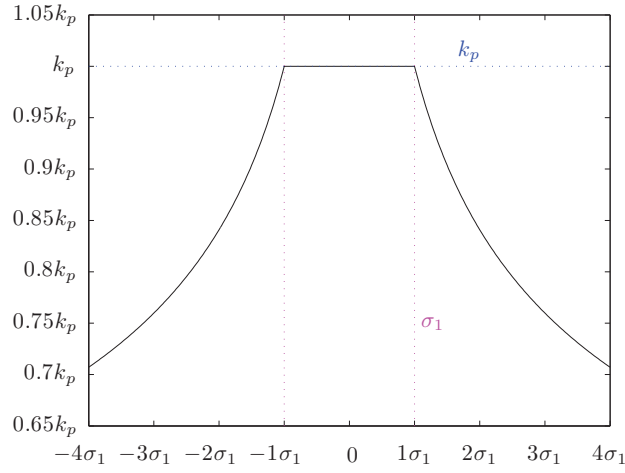


Figure 3.7: Évolution typique du gain proportionnel non linéaire en fonction de l'erreur du ZMP (normalisée par rapport à  $\delta_1$ ). Le gain est saturé à  $k_p$  quand la norme de l'erreur est en dessous de  $\delta_1$ , sinon le gain décroît.

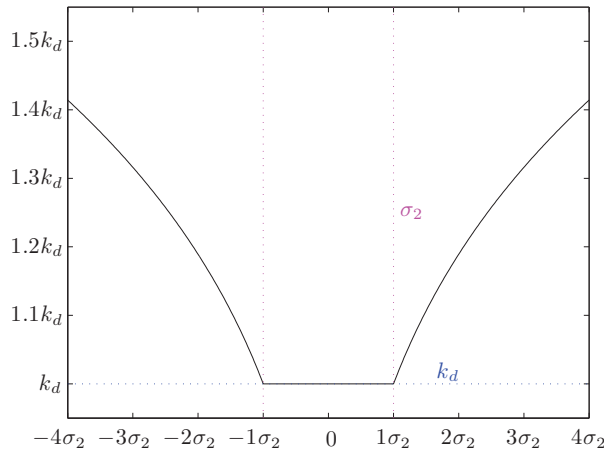


Figure 3.8: Évolution typique du gain dérivé non linéaire en fonction de la dérivée de l'erreur du ZMP (normalisée par rapport à  $\delta_2$ ). Le gain est saturé à  $k_d$  quand la norme de la dérivée de l'erreur est en dessous de  $\delta_2$ , sinon le gain augmente.

effet, la correction en vitesse n'a pas besoin d'être importante si l'erreur est faible car cela diminue la précision ; en revanche, si l'erreur de vitesse est grande, l'augmentation du gain améliore la rapidité du système corrigé.



Ceci permet de produire une correction qui améliore la rapidité du système tout en améliorant l'amortissement et la stabilité.

### 3.5.3 Projection sphérique de la régulation du ZMP

Dans le cas de perturbations importantes de l'équilibre, comme celles induites par un sol incliné, la projection de la régulation du ZMP dans l'espace de la tâche de régulation du CoM peut produire des postures indésirables. En effet, si l'erreur du ZMP est importante ou de longue durée, la position désirée du CoM peut être étirée jusqu'à des positions atteignables comme illustré sur la Figure 3.9. Les jambes sont alors tendues, en positions singulières et des auto-collisions entre les jambes du robot peuvent se produire.

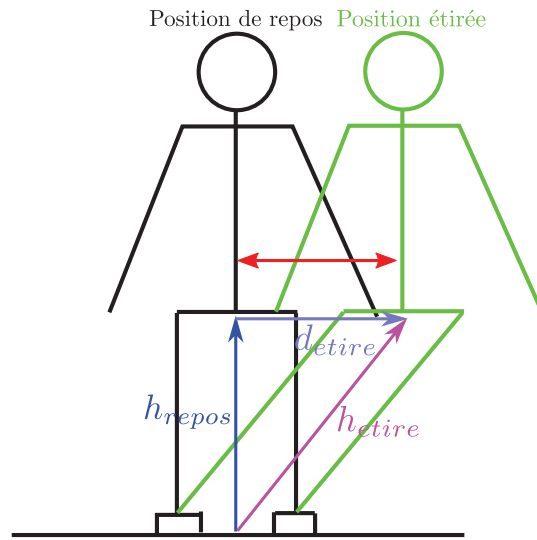


Figure 3.9: Illustration de la problématique liée à la projection planeaire de la régulation du ZMP, la position du CoM désirée peut être trop étirée. La longueur des jambes au repos est  $h_{\text{repos}}$ , la longueur des jambes étirées est  $h_{\text{etire}} = \sqrt{h_{\text{repos}}^2 + d_{\text{etire}}^2}$ . Si  $d_{\text{etire}}$  est grand, les jambes se retrouvent en position singulière.

Une meilleure solution est d'utiliser une projection sphérique de cette régulation afin de rester dans un espace atteignable comme illustré sur la Figure 3.13.

La projection sphérique est une projection de la régulation de l'erreur du ZMP sur une sphère dont le centre est situé entre les deux pieds et de rayon égal à la hauteur du centre de masse (cf. Figure 3.10).

L'équation de la projection sphérique de la régulation de l'erreur du ZMP  $\varepsilon_{\text{SP}} =$

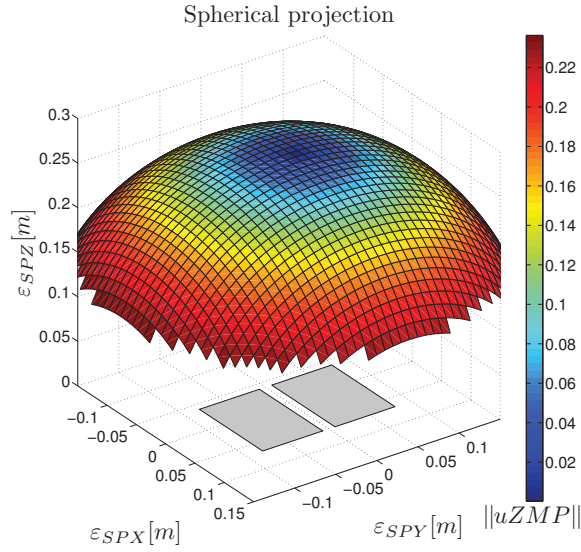


Figure 3.10: Espace de la projection sphérique en fonction de la norme de  $u_{ZMP}$  ( $\beta = 1$  et  $\gamma = 1$ ). Les empreintes de pied sont affichées en gris.

$[\varepsilon_{SPX} \ \varepsilon_{SPY} \ \varepsilon_{SPZ}]^T$ , avec  $u_{ZMP} = [u_{ZMPX} \ u_{ZMPY}]^T$  provenant de l'équation (3.5.7), peut être déduite de la trigonométrie :

$$\begin{aligned} \varepsilon_{SPX} &= h_{CoM} \sin \left( \frac{\beta \cdot u_{ZMPX}}{h_{CoM}} \right), \\ \varepsilon_{SPY} &= h_{CoM} \sin \left( \frac{\gamma \cdot u_{ZMPY}}{h_{CoM}} \right), \\ \varepsilon_{SPZ} &= \sqrt{h_{CoM}^2 - u_{ZMPX}^2 - u_{ZMPY}^2}. \end{aligned} \quad (3.5.10)$$

où  $h_{CoM}$  est la hauteur du CoM.  $\beta$  et  $\gamma$  sont des paramètres d'ajustement. Ils permettent de modifier la forme de la projection sphérique comme illustré sur la Figure 3.11. Par la suite, on prendra par défaut  $\beta = 1$  et  $\gamma = 1$  sauf si le contraire est précisé.

La Figure 3.12 montre la trajectoire du CoM de référence dans le plan frontal pour une perturbation du ZMP selon l'axe  $y$ .

La projection sphérique de la régulation de l'erreur du ZMP est ensuite projetée dans l'espace de la tâche de régulation du CoM pour produire un asservissement hybride cinématique/dynamique :

$$\varepsilon_{CZ} = \varepsilon_{CoM} + \varepsilon_{SP} \quad (3.5.11)$$

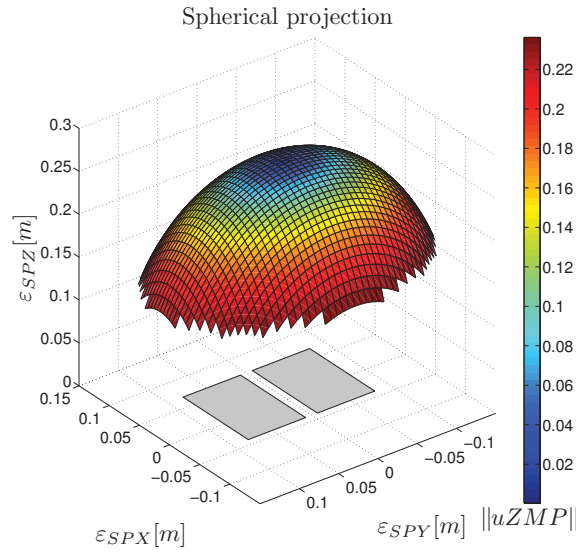


Figure 3.11: Espace de la projection sphérique en fonction de la norme de  $u_{ZMP}$  ( $\beta = 0.5$  et  $\gamma = 0.75$ ). Les empreintes de pied sont affichées en gris.

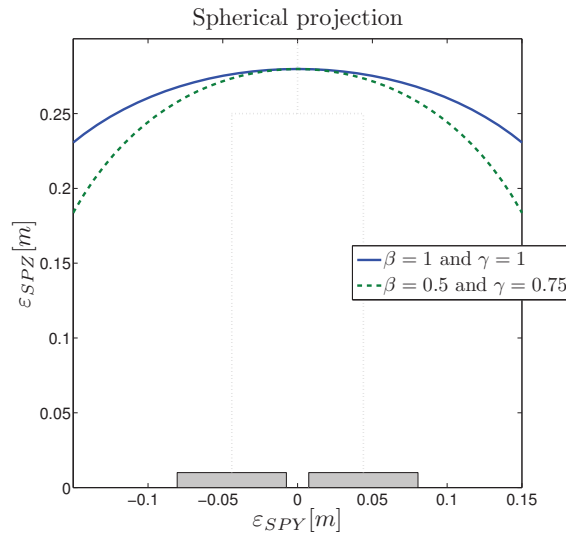


Figure 3.12: Vue frontale de la projection sphérique avec  $u_{ZMPX} = 0$  et  $u_{ZMPX}$  variant dans le domaine  $\left[-h_{CoM} \frac{\pi}{2}; h_{CoM} \frac{\pi}{2}\right]$ . La structure du robot est affichée en gris. Les paramètres d'ajustement de la projection sphérique sont à  $\beta = 1$  et  $\gamma = 1$  pour le trait continu bleu et  $\beta = 0.5$  et  $\gamma = 0.75$  pour le trait discontinu vert.

où  $\varepsilon_{CZ}$  est l'objectif lié à la stabilité contenant la poursuite de la trajectoire du CoM ainsi que la régulation de l'erreur du ZMP ; et  $\varepsilon_{CoM}$  l'erreur de poursuite du CoM.

L'orientation du buste doit être ajustée pour s'adapter à cette modification comme illustré sur la Figure 3.13.

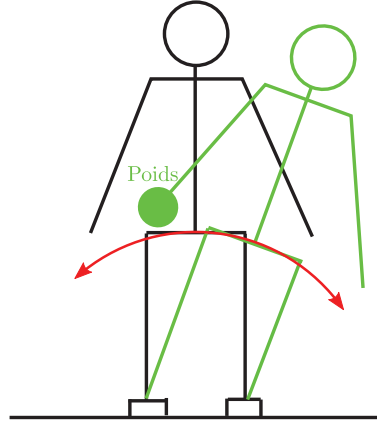


Figure 3.13: Vue frontale du mouvement induit par la régulation du ZMP pour un changement de poids du bras. On observe la projection sphérique de la régulation du ZMP avec la compensation de l'orientation du buste.

L'erreur d'orientation du buste devient  $\varepsilon_{\text{ori\_sp}}$ , définie par :

$$\begin{aligned}\varepsilon_{\text{ori\_sp}}(r) &= \varepsilon_{\text{ori}}(r) + \text{atan2}(u_{\text{ZMP}}(y), h_{\text{CoM}}), \\ \varepsilon_{\text{ori\_sp}}(p) &= \varepsilon_{\text{ori}}(p) + \text{atan2}(u_{\text{ZMP}}(x), h_{\text{CoM}}), \\ \varepsilon_{\text{ori\_sp}}(y) &= \varepsilon_{\text{ori}}(y).\end{aligned}\tag{3.5.12}$$

où  $\varepsilon_{\text{ori}}(r)$ ,  $\varepsilon_{\text{ori}}(p)$  et  $\varepsilon_{\text{ori}}(y)$  sont respectivement les composantes roulis, tangage et lacet de l'erreur d'orientation du buste

La Figure 3.13 représente la réaction typique du schéma de contrôle proposé à une perturbation de type sol incliné ou une perturbation externe constante telle que le changement de poids d'un bras. Ces résultats sont observables en expérimentation dans la section 5.3.2.

### 3.6 Architecture globale de la commande hybride cinématique/dynamique

L'architecture globale de la commande hybride cinématique/dynamique utilise le formalisme de tâches décrit dans la section 3.2.3. Ce formalisme est utilisé pour suivre les quatre objectifs présentés précédemment :

- la pose relative des pieds présentée dans la section 2.4.1 ;
- la position du centre de masse avec la projection sphérique de la régulation du ZMP présentée dans la section 3.5.3 ;
- l'orientation du buste présentée dans la section 3.3.1 et
- l'éloignement des butées articulaires présenté dans la section 3.3.2.

Les mouvements corps-complet du robot sont créés en utilisant ces quatre tâches comme illustré sur la Figure 3.14.

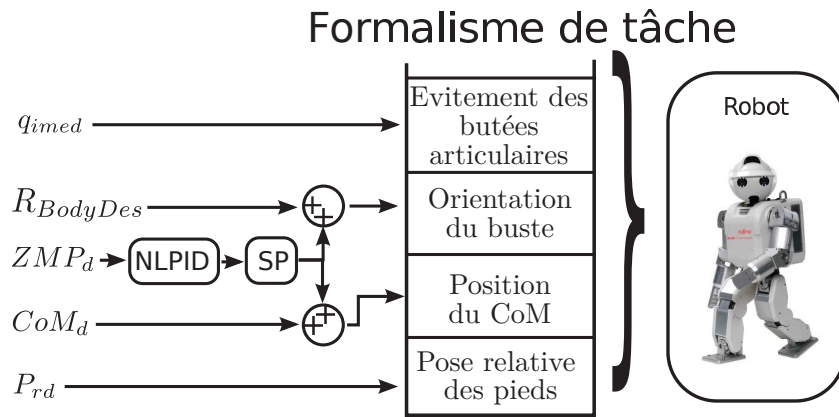


Figure 3.14: Architecture globale de la commande proposée avec la hiérarchie d'objectifs. NLPID et SP sont respectivement les acronymes de PID non linéaire et de projection sphérique.

L'utilisation du formalisme de tâches hiérarchique implique de décider d'une hiérarchie entre les tâches. La première tâche considérée est la pose relative des pieds. Ce choix a été décidé car une petite erreur sur l'orientation des pied peut rendre impossible le double support.

La loi de contrôle pour le suivi de trajectoire de la pose des pieds est :

$$\varepsilon_{q1} = J_r^+ \varepsilon_r \quad (3.6.1)$$

où  $\varepsilon_{q1}$  est une variable intermédiaire correspondant au déplacement à appliquer sur la position des articulations pour réaliser l'objectif,  $J_r$  et  $\varepsilon_r$  sont définis dans la section 2.4.1.

La deuxième tâche considérée est la position du centre de masse avec la projection sphérique de la régulation du ZMP. Cet objectif est placé en deuxième dans la hiérarchie

car les faibles erreurs sur la position du centre de masse peuvent être rattrapées sans induire une perte de l'équilibre. L'équilibre du robot doit être considéré comme prioritaire devant toutes les tâches esthétiques ou non vitales.

La loi de contrôle incluant les deux tâches précédentes est :

$$\varepsilon_{q2} = \varepsilon_{q1} + (\tilde{J}_{CoM})^+ (\varepsilon_{CZ} - J_{CoM} \varepsilon_{q1}) \quad (3.6.2)$$

avec :

$$\tilde{J}_{CoM} = J_{CoM} P_r \quad \text{and} \quad P_r = (I - J_r^+ J_r) \quad (3.6.3)$$

où  $\varepsilon_{q2}$  est une variable intermédiaire correspondant au déplacement à appliquer sur la position des articulations pour réaliser les deux objectifs.

La troisième tâche considérée est l'orientation du buste. Les tâches esthétiques ou non vitales peuvent être ajoutées à ce niveau hiérarchique en utilisant la formulation récursive de tâches de Siciliano [Siciliano et Slotine, 1991]. La manipulation d'objets, l'orientation du regard ou l'interaction homme-robot sont autant de tâches possibles pour ce niveau de hiérarchie.

La loi de contrôle incluant les trois tâches précédentes est :

$$\varepsilon_{q3} = \varepsilon_{q2} + (\tilde{J}_{ori})^+ (\varepsilon_{ori\_sp} - J_{ori} \varepsilon_{q2}) \quad (3.6.4)$$

avec :

$$\tilde{J}_{ori} = J_{ori} P_{CoM} \quad \text{and} \quad P_{CoM} = (P_r - \tilde{J}_{CoM}^+ \tilde{J}_{CoM}) \quad (3.6.5)$$

où  $\varepsilon_{q3}$  est une variable intermédiaire correspondant au déplacement à appliquer sur la position des articulations pour réaliser les trois objectifs.

L'objectif le moins prioritaire devrait toujours être l'éloignement des butées qui gère les limites articulaires et les singularités. Cette tâche doit toujours être ajoutée en dernier car aucune tâche ne peut être réalisée ensuite. Ceci est causé par l'application d'une tâche sur toutes les articulations dans l'espace articulaire. Une tâche située après dans la hiérarchie n'aurait aucune influence sur les mouvements du robot.

La loi de contrôle finale est formulée par :

$$\varepsilon_{q4} = \varepsilon_{q3} + (P_{ori})^+ (\varepsilon_{Joints} - \varepsilon_{q3}) \quad (3.6.6)$$

avec :

$$P_{\text{ori}} = (P_{\text{CoM}} - \tilde{J}_{\text{ori}}^+ \tilde{J}_{\text{ori}}) \quad (3.6.7)$$

où  $\varepsilon_{q4}$  est loi de contrôle finale correspondant au déplacement à appliquer sur la position des articulations pour réaliser les quatre objectifs. Cette loi de contrôle finale permet de générer des mouvements corps-complet dynamiquement stables.

L'architecture de commande hybride cinématique/dynamique proposée peut être résumée sous la forme du schéma bloc de la Figure 3.15.

### 3.7 Spécificités de l'architecture de commande proposée

L'architecture de commande hybride cinématique/dynamique proposée bénéficie de trois principaux avantages :

- Le mouvement n'est pas décomposé en phases disjointes ;
- La commande est purement réactive ;
- La génération de mouvements est réalisée à partir d'un nombre réduit de trajectoires.

Ces différentes spécificités sont détaillées ci-après.

#### Une architecture sans décomposition du mouvement en phases élémentaires.

Contrairement aux approches classiques de la littérature, cette approche n'impose pas de décomposer la marche en plusieurs phases comme celle de simple support, double support et impact par exemple, ce qui nécessite de commuter entre différentes lois de commande. En effet, dans l'approche proposée, une seule loi de commande continue est utilisée.

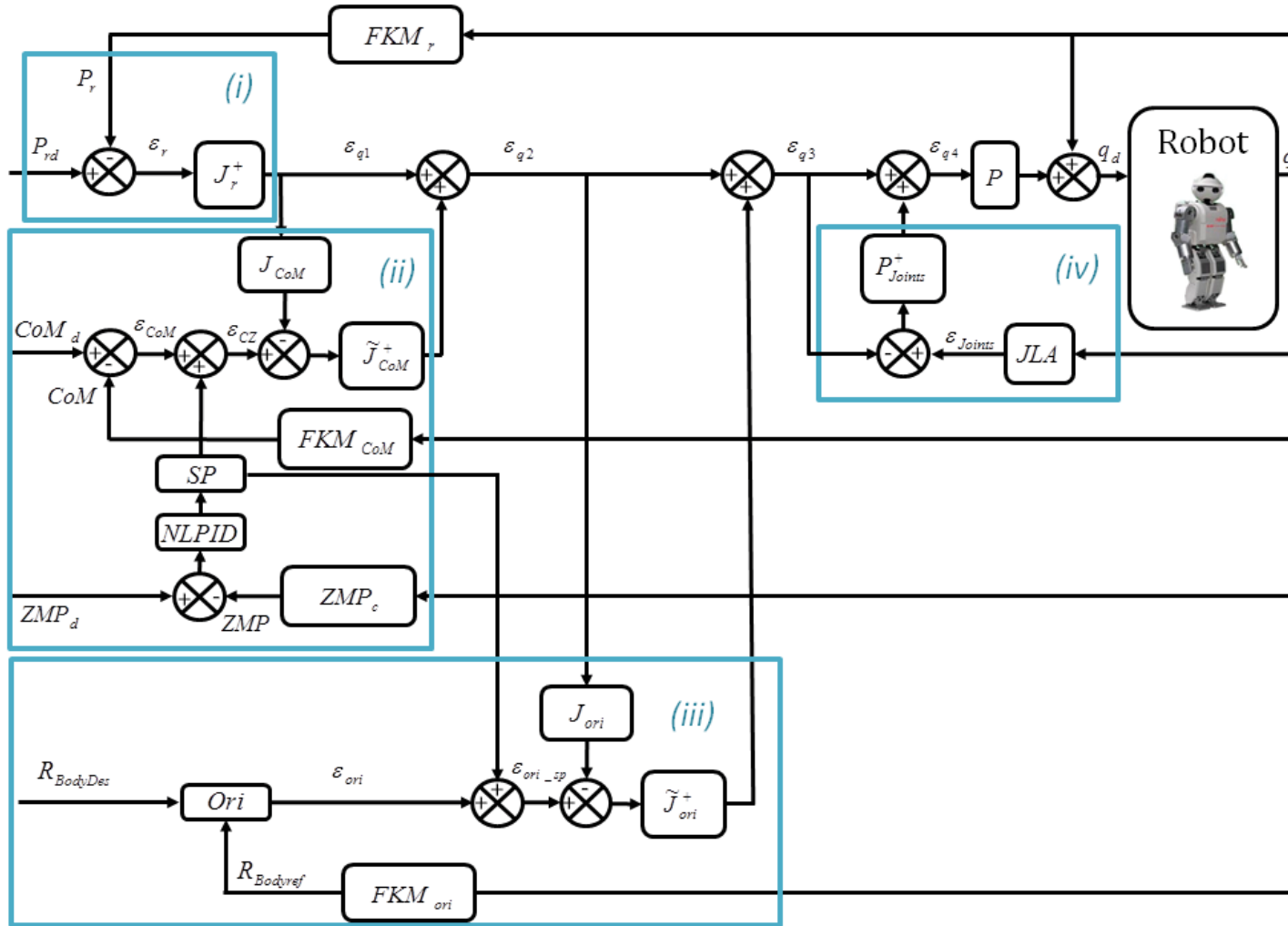


Figure 3.15: Schéma bloc de l'architecture globale de la commande proposée avec la hiérarchie d'objectifs. NLPID et SP sont respectivement les acronymes de PID non linéaire et de projection sphérique.



Ceci est principalement dû au cycle des pieds qui permet d'utiliser une loi de commande unique. Il est ainsi possible de créer des scénarios complexes de déplacement grâce au cycle des pieds.

Des tâches pour contrôler les mouvements des mains ou du regard peuvent facilement être ajoutées en utilisant le formalisme des tâches hiérarchique sans gêner la stabilité de la locomotion.

### **Une architecture purement réactive.**

L'architecture de commande hybride cinématique/dynamique proposée est purement réactive. Cela signifie que les informations des capteurs sont utilisées directement pour contrôler le robot.

En évitant d'utiliser des calculs liés à la planification du mouvement, le robot est réactif aux changements de son environnement et peut donc se déplacer dans un environnement dynamique réaliste.

### **Minimisation des données nécessaires.**

L'architecture de commande hybride cinématique/dynamique proposée permet de générer des mouvements corps-complet, des mouvements de marche dynamiquement stable en ne nécessitant que la position du centre de masse et la pose relative des pieds comme données de référence, soit 9 trajectoires.

Cette minimisation des données est le point de départ de cette architecture de commande qui a été créée pour imiter la locomotion humaine à partir de peu de données afin de ne pas avoir une simple imitation ne respectant pas les limitations des robots humanoïdes.

## **3.8 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté une architecture de commande permettant la commande corps-complet des robots humanoïdes, c'est une architecture de commande hybride cinématique/dynamique.

Nous avons présenté le formalisme de tâches utilisé dans la partie cinématique du contrôle qui permet de suivre plusieurs objectifs en respectant une hiérarchie entre eux.

Nous avons ensuite présenté les quatre objectifs cinématiques utilisés pour produire les mouvements corps-complet, à savoir :

1. la pose relative des pieds ;
2. la position du centre de masse ;
3. l'orientation du buste ;
4. l'éloignement des butées articulaires.

La stabilité dynamique du robot a été renforcée par l'utilisation d'un stabilisateur basé sur la mesure et la régulation du ZMP. Le stabilisateur utilise un contrôleur PD ou un contrôleur PID non linéaire ; ainsi qu'une projection planaire ou sphérique de cette régulation dans l'espace de la tâche du CoM.

Cette dernière étape nous a permis de créer l'architecture globale de commande hybride cinématique/dynamique.

Dans le chapitre suivant, nous proposons un simulateur pour tester nos propositions. Une implémentation de l'architecture de commande proposée est mise en œuvre avec plusieurs scénarios applicatifs.



# Modélisation et simulation du mouvement d'un robot humanoïde

## Sommaire

3.1	Introduction . . . . .	51
3.2	Rappel de la commande cinématique à base de tâches . . . . .	52
3.3	Contrôle cinématique à base de quatre objectifs . . . . .	59
3.4	Nécessité d'une gestion de l'équilibre dynamique . . . . .	62
3.5	Un stabilisateur dynamique basé sur la mesure du ZMP . . . . .	63
3.6	Architecture globale de la commande hybride cinématique/dynamique . . . . .	71
3.7	Spécificités de l'architecture de commande proposée . . . . .	74
3.8	Conclusion . . . . .	76

## 4.1 Introduction

Ce chapitre est consacré aux simulations et au simulateur permettant de développer, tester et améliorer la commande hybride cinématique/dynamique proposée dans le chapitre 3.

Le simulateur développé durant cette thèse sera présenté en premier, accompagné par une explication des divers choix de modélisation des robots. Cette présentation est suivie des résultats de simulations issus de quatre scénarios correspondant à des utilisations très différentes du simulateur. En effet, les simulations incluent des simulations cinématiques ou dynamiques, de coordination posturale ou de mouvements de marche ou encore des validations de partie de la commande hybride cinématique/dynamique proposée.

## 4.2 Présentation de la modélisation des robots

Les lois de commande proposées dans les chapitres précédents ne peuvent être implémentées directement sur des robots sous peine de provoquer des dégâts matériel importants. La norme, en robotique, est d'utiliser un simulateur pour tester les algorithmes de commande avant leur implémentation réelle sur les robots. Cela permet de déceler la plupart des problèmes algorithmiques, calculatoires ou de trajectoire sans abîmer le matériel ; bien que cette vérification ne soit pas formelle et puisse laisser passer des problèmes.

Un environnement de simulation a été développé pendant cette thèse pour tester les hypothèses de travail et les lois de contrôle proposées. Ce simulateur a été développé pour permettre la simulation de robots multi-corps rigides à base flottante avec plusieurs points de contact.

Ce simulateur permet la simulation cinétique et dynamique des nombreux robots modélisés. Dans les sections suivantes, le simulateur et les choix de modélisation seront détaillés.

### 4.2.1 Structure générique de données représentant les robots

La représentation informatique des robots a été réalisée selon une arborescence comme proposé dans [Kajita *et al.*, 2009]. Cette représentation arborescente permet la modification rapide de la structure des robots et facilite énormément la modélisation des robots. L'arborescence modélisant un humain issu des sujets de l'étude du chapitre 2 est représentée sur la Figure 4.1.

Chaque nœud de l'arborescence représente un segment et chaque transition représente un ddl. Pour simuler le comportement du robot, les nœuds contiennent les paramètres des segments. Ces paramètres sont séparables en trois catégories détaillées par la suite, à savoir : les paramètres obligatoires, les paramètres optionnels et les paramètres calculables.

Les paramètres obligatoires sont :

- $j$  : l'identifiant du segment,
- *sister* : l'identifiant du segment sœur pour générer l'arborescence,
- *child* : l'identifiant du segment enfant pour générer l'arborescence,
- $a$  : l'axe de rotation du segment par rapport à son parent (vecteur),
- $b$  : la position relative du segment par rapport à son parent (vecteur) [m],
- $q$  : la position articulaire [rad].

Les paramètres obligatoires sont le minimum nécessaire pour créer le modèle géométrique direct (MGD) et les visualisations filaires. Une visualisation filaire est une représentation de la structure d'un modèle en 3D à l'aide de lignes.

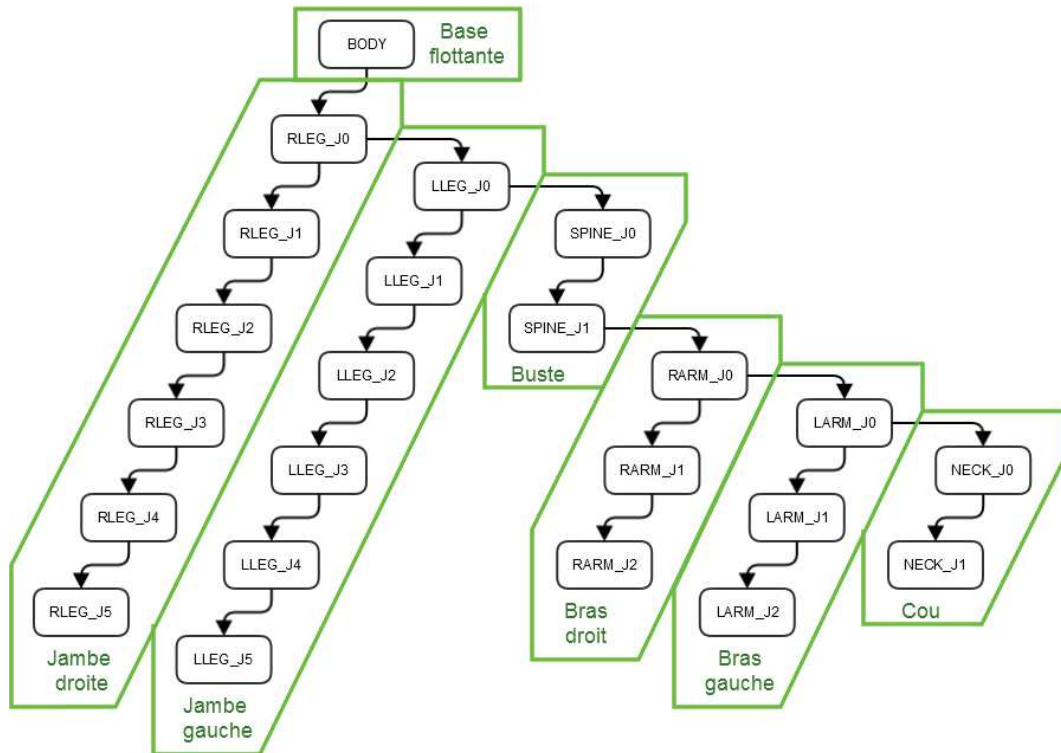


Figure 4.1: Représentation du modèle simplifié de la cinématique de l'humain présenté dans la section 2.3.2.3 sous la forme d'un arbre binaire. Le modèle dispose de 22 ddl et la représentation est donc composée d'une base flottante et de 22 segments. Chaque nœud de l'arborescence est relié aux autres par une branche parent, sœur ou enfant. La représentation graphique de ce modèle est illustrée sur la Figure 4.4

Les paramètres optionnels sont :

- *name* : le nom du segment pour faciliter la compréhension des fichiers,
- *m* : la masse du segment [kg] pour le calcul du Centre de masse (CoM),
- *c* : le centre de gravité (repère local) [m] pour le calcul du CoM,
- *I* : le moment d'inertie (repère local) [kg.m<sup>2</sup>] pour le calcul de la dynamique,
- *gr* : le rapport de réduction du moteur pour le calcul de la dynamique,
- *u* : le couple articulaire [Nm] pour le calcul de la dynamique,
- *uc* : le couple de commande [Nm] pour le calcul de la dynamique,
- *qmin* : la limite articulaire inférieure [rad],
- *qmax* : la limite articulaire supérieure [rad],
- *umin* : la limite du couple moteur inférieure [Nm],
- *umax* : la limite du couple moteur supérieure [Nm],

- *fixed* : l'articulation fixe pour simuler des défauts ou ne pas générer de mouvements sur une articulation,
- *color* : la couleur de l'articulation pour la visualisation du modèle filaire,
- *face* : les faces pour la visualisation du modèle filaire,
- *vertex* : la forme pour la visualisation du modèle filaire,
- *obj* : le fichier OBJ contenant le modèle 3D pour les visualisations avancées.

Selon les utilisations, une partie des paramètres optionnels peut être déclarée.

Les paramètres calculés sont :

- *mother* : l'identifiant du segment parent,
- *p* : la position absolue du segment [m],
- *R* : l'orientation absolue du segment sous forme de matrice de rotation,
- *v* : la vitesse linéaire absolue du segment [m/s],
- *dv* : l'accélération linéaire absolue du segment [m/s<sup>2</sup>],
- *w* : la vitesse de rotation absolue du segment [rad/s],
- *dw* : l'accélération de rotation absolue du segment [rad/s<sup>2</sup>],
- *dq* : la vitesse articulaire [rad/s],
- *ddq* : l'accélération articulaire [rad/s<sup>2</sup>] .

Ces paramètres peuvent être calculés pendant l'exécution du programme selon l'utilisation.

Pour pouvoir simuler les algorithmes proposés sur différents robots, nous avons modélisé les robots HOAP-3, Sherpa, HYDROID ainsi qu'un modèle à 22 ddl correspondant à un être humain. Les paramètres obligatoires et optionnels correspondant aux modèles de ces robots sont enregistrés numériquement dans un fichier XML structuré, standardisé et interopérable. Le simulateur utilise un parseur pour transformer le fichier XML descriptif en l'arborescence utilisée par le simulateur.

Les données cinématiques et dynamiques de l'être humain sont extraites de l'étude d'un des sujets présentés dans le chapitre 2.

### 4.2.2 Simulation dynamique

Le simulateur proposé permet de faire des simulations cinématiques ou dynamiques. La simulation dynamique s'appuie sur un calcul itératif de la dynamique pour calculer l'état du robot. Cette simulation est fortement inspirée du livre de Kajita [Kajita *et al.*, 2009] afin de proposer des algorithmes robustes et éprouvés. Les choix d'implémentation adoptés pour la simulation dynamique sont explicités dans les sections suivantes.

#### 4.2.2.1 Dynamique du robot

La dynamique des modèles des robots est calculée en utilisant une approche itérative de Newton-Euler qui permet de calculer la forme matricielle de la dynamique du robot [Sciavicco et Siciliano, 2000; Spong *et al.*, 2006].

La formulation itérative de la dynamique par Newton-Euler peut être écrite :

$$\begin{bmatrix} f_j \\ \tau_j \end{bmatrix} = I_j^s \dot{\xi}_j + \xi_j \times I_j^s \xi_j - \begin{bmatrix} f_j^E \\ \tau_j^E \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_{j+1} \\ \tau_{j+1} \end{bmatrix} \quad (4.2.1)$$

avec  $\xi_j = \begin{bmatrix} v_{0j} \\ w_j \end{bmatrix}$

où  $f_j$  et  $\tau_j$  représentent les forces et moments du corps parent,  $I_j^s \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$  représente la matrice inertielle spatiale,  $f_j^E$  et  $\tau_j^E$  représentent les forces et moments extérieurs,  $f_{j+1}$  et  $\tau_{j+1}$  représentent les forces et moments du corps enfant et  $v_{0j}$  et  $w_j$  représentent la vitesse spatiale du corps rigide.

Cette formulation permet le calcul récursif de la dynamique (force et moment) pour un système multi-corps rigides en prenant en compte les forces extérieures telle que les points d'appui.

La dynamique peut être exprimée par la suite sous la forme matricielle par l'équation (3.2.5). Si l'on sépare les couples appliqués par la commande et les efforts extérieurs, on obtient :

$$A(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = U_g + J^T \lambda \quad (4.2.2)$$

où  $A(q)$  représente la matrice des inerties,  $C(q, \dot{q})$  représente les effets Coriolis et centrifuges,  $G(q)$  représente les termes liés à la force de gravité,  $U_g$  représente les couples appliqués par la commande,  $J$  est la jacobienne permettant de passer des forces extérieures aux couples articulaires et  $\lambda$  représente les forces de contact.

Cette approche itérative permet de simuler et évaluer le comportement du robot par rapport à une loi de commande.

#### 4.2.2.2 Forces de contact

La modélisation des forces de contact peut être classée en deux catégories. La première catégorie est la modélisation des forces de contact par pénalités, tandis que la seconde catégorie est la modélisation des forces de contact par contraintes.

La modélisation des forces de contact par pénalités modélise le contact pied/sol en utilisant des points de contact où le contact se comporte comme un système masse-ressort-amortisseur [Rengifo *et al.*, 2009]. Les points de contact sont répartis sous la semelle, le



plus souvent avec quatre points de contact, un par coin pour une semelle de forme rectangulaire.

La modélisation des forces de contact par contraintes, à l'opposé, considère le pied du robot comme étant en contact plan avec le sol et utilise cette hypothèse pour calculer les couples ou accélérations articulaires nécessaires à la réalisation de cette hypothèse [Ruspini et Khatib, 1997].

Pour notre simulateur, nous avons utilisé l'approche par pénalités, comme illustré sur la Figure 4.2 car cette modélisation s'adapte bien à une simulation à pas constant. Le système masse-ressort-amortisseur utilisé a été modifié afin d'imposer des comportements non linéaires pour améliorer la stabilité de la simulation. Les glissements des pieds sont freinés par un système masse-amortisseur sur les déplacements latéraux.

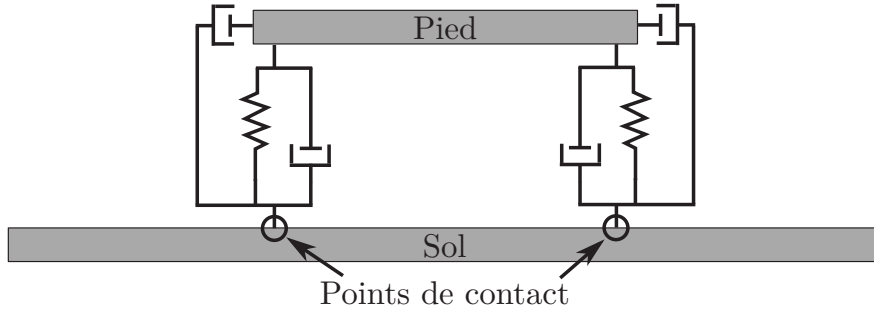


Figure 4.2: Illustration du modèle de contact pied/sol par pénalité.

Les contacts sont calculés comme des systèmes masse-ressort-amortisseur [Rodas, 2010] avec plusieurs points de contacts par pied. Dans le simulateur, le choix entre 4 et 20 points de contact est possible. A titre d'exemple, si on utilise quatre points de contacts, ceux-ci sont situés aux coins du pied. Si on utilise vingt points de contacts, ils sont répartis équitablement sous le pied. La multiplication des points de contact permet de lisser la mesure du centre de pression comme illustré sur la Figure 4.3.

Pour un point de contact, la force extérieure appliquée est donnée par :

$$f_z = \begin{cases} 0 & \phi(t) > 0 \\ -k[\phi(t)]^{pk} - c[\dot{\phi}(t)]^{pc} & \phi(t) \leq 0 \end{cases} \quad (4.2.3)$$

où  $\phi(t)$  représente la hauteur du pied au-dessus du sol,  $k$  et  $c$  représentent la constante de raideur et le coefficient d'amortissement,  $pk$  et  $pc$  sont des paramètres de réglage de la non linéarité. Une saturation permet d'éviter des forces de contact négatives ( $f_z < 0$ ) pendant le décollage du pied, quand le pied est peu enfoncé ( $\phi(t) \approx 0$ ) mais avec une vitesse positive ( $\dot{\phi}(t) > 0$ ).

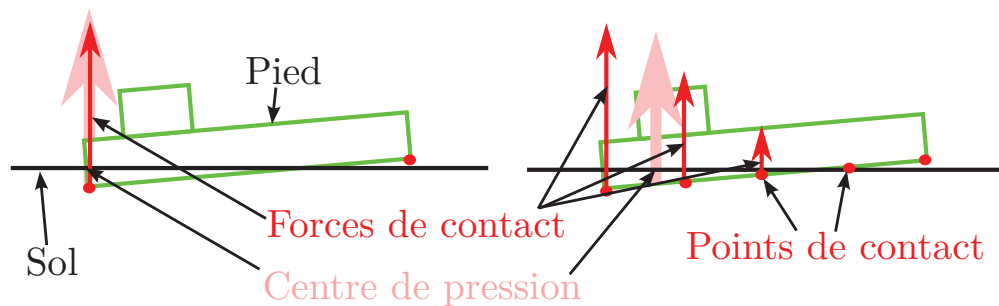


Figure 4.3: La multiplication des points de contact permet un calcul précis du centre de pression dans le polygone de sustentation quand le pied n'est pas parfaitement à plat.

### 4.2.3 Simulateur et interface graphique

La totalité du simulateur a été développée en langage C afin de permettre une exécution efficace et rapide de l'algorithme de commande. Le simulateur est aussi utilisé pour la validation de l'approche de commande dans le chapitre 5. Il était donc important que le langage de programmation utilisé soit commun aux plate-formes robotiques utilisées et très rapide à l'exécution au vu des contraintes temps-réel imposées par les plate-formes.

L'interface graphique permet une visualisation en temps-réel de la simulation. Une capture d'écran d'une simulation est illustrée sur la Figure 4.4. Elle est désactivable pour permettre des simulations plus rapides.

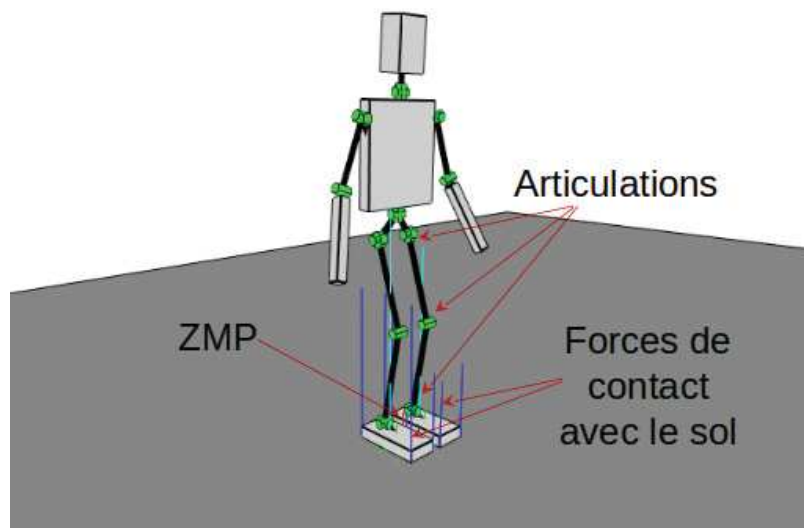


Figure 4.4: Vue de l'interface graphique du simulateur développé.

Les bibliothèques suivantes ont été utilisées dans le logiciel :

- GSL pour les calculs matriciels,
- ezXML pour la manipulation des fichiers XML,
- OpenGL pour le graphisme,
- SDL pour l'interaction.

La bibliothèque GSL est utilisée pour les calculs numériques d'algèbre linéaire, matriciel et vectoriel [Galassi *et al.*, 2009]. Cette bibliothèque offre une interface avec la bibliothèque de bas niveau standardisée Basic Linear Algebra Subprograms (BLAS). Un des avantages de cette bibliothèque est d'offrir des macros de vérification de taille des matrices et des vecteurs, activables pendant la phase de développement (debug : pour une exécution des programmes sécurisée mais lente) puis déactivables pendant l'utilisation en temps-réel (release : pour une exécution rapide).

La bibliothèque ezXML est utilisée pour parser les fichiers XML [Voisine, 2013], afin d'extraire la structure du robot définie dans la section 4.2.1. Ils peuvent aussi être utilisés pour enregistrer l'état du robot (toutes les variables) pendant une simulation.

La bibliothèque OpenGL est utilisée pour afficher une visualisation 3D des simulations [Silicon Graphics, 2006]. Dans le simulateur, plusieurs niveaux de qualité sont disponibles pour la visualisation allant du modèle filaire au modèle volumique 3D avec ombres.

La bibliothèque SDL permet l'interaction de l'utilisateur avec la simulation afin de modifier les paramètres de simulation ou de déplacer la caméra dans la simulation.

## 4.3 Résultats de simulations

Le simulateur présenté dans la section précédente a été utilisé pour réaliser quatre scénarios afin de valider les lois de commande proposées.

Ces scénarios sont :

- mouvement de squat sur un modèle humain ;
- étude de l'apport du stabilisateur sur les marges de stabilité ;
- marche quasi-statique du robot bipède Sherpa ;
- marche dynamique du robot humanoïde HOAP-3.

Les résultats obtenus pour ces scénarios sont présentés et discutés ci-après.

### 4.3.1 Scénario 1 : Mouvement de squat sur un modèle humain

Le premier scénario correspond à un mouvement de squat sur un modèle humain. Le squat, aussi appelé flexion sur jambes, consiste à effectuer des flexions des membres inférieurs comme illustré sur la Figure 4.5. Ce mouvement est répété plusieurs fois de manière

cyclique pour renforcer les muscles de la cuisse et des fessiers. Ce mouvement est un des mouvements fortement utilisés en bio-mécanique pour l'étude de la coordination posturale chez l'humain [Fry *et al.*, 2003; Bonnet *et al.*, 2012]. Ce scénario a été développé pour valider le schéma de contrôle et vérifier la génération de mouvements corps-complet.

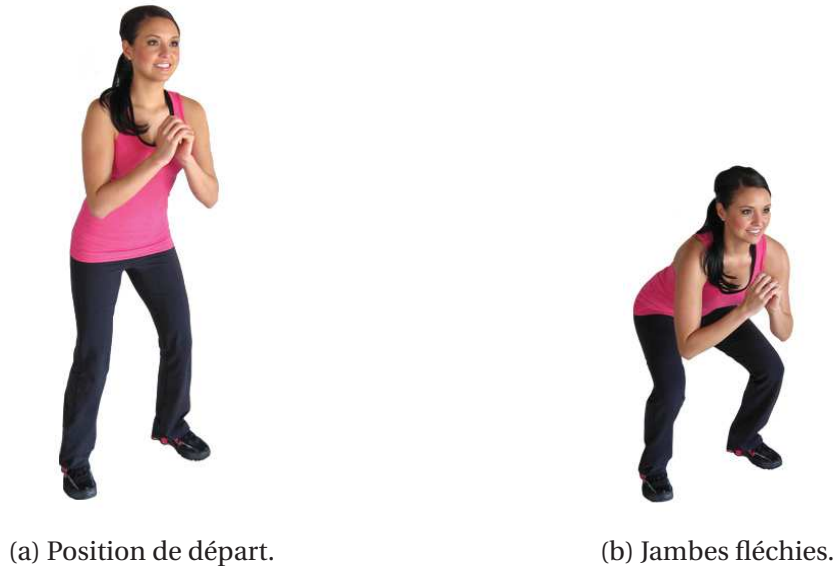


Figure 4.5: Illustration du mouvement de squat.

#### 4.3.1.1 Objectifs et mise en œuvre

Pour ce scénario un modèle humain issu des sujets de l'étude du chapitre 2 a été utilisé. La loi de commande proposée au chapitre 3 a été implémentée dans le simulateur en prenant une trajectoire sinusoïdale sur la composante verticale du CoM. Les autres trajectoires étant gardées constantes. Ces trajectoires permettent de générer un mouvement semblable à celui du squat humain. La simulation dynamique prend place sur un sol plat.

#### 4.3.1.2 Résultats

Le mouvement résultant est observable sur la Figure 4.6. L'évolution des trajectoires articulaires du modèle humain est observable sur la Figure 4.7. Sur cette figure, le modèle effectue le mouvement de squat désiré grâce à l'approche de commande proposée. Les trajectoires de référence du CoM suivent une sinusoïde sur l'axe vertical, pendant que les trajectoires des pieds sont constantes.

Le mouvement généré utilise une grande majorité des ddls comme le montre la figure 4.7. En effet, le mouvement du CoM désiré suit une sinusoïde sur l'axe vertical, les ddls permettant le déplacement du robot dans le plan frontal sont alors peu sollicités.

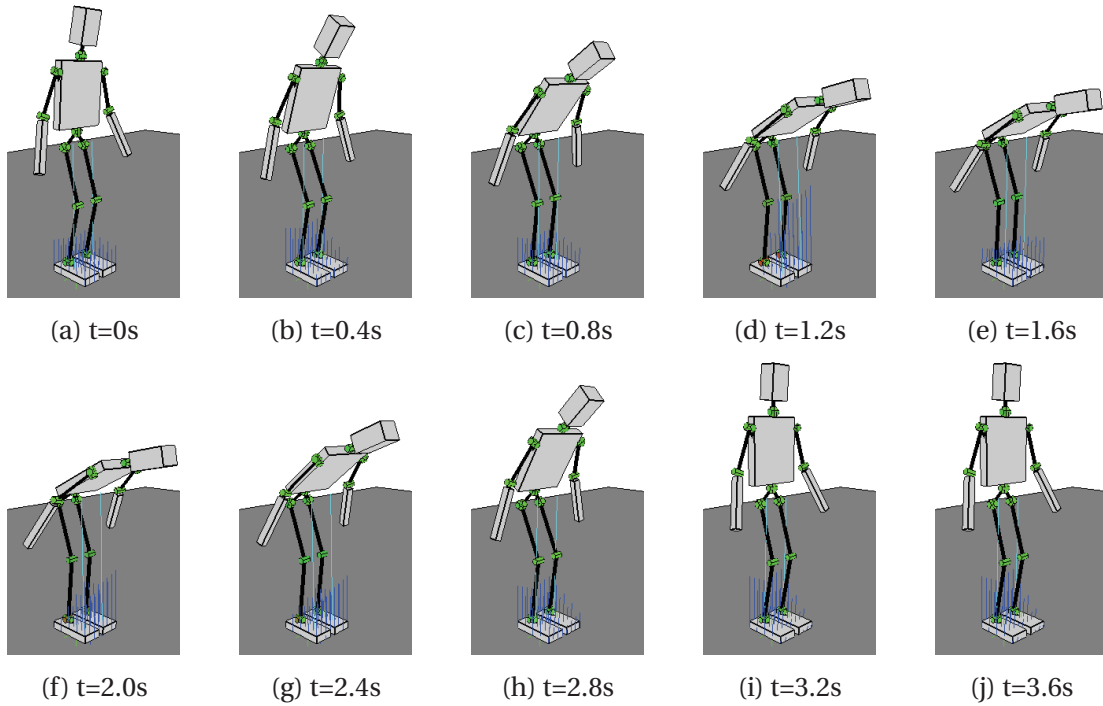


Figure 4.6: Séquence illustrant le mouvement de squat appliqué sur le modèle humain pour le scénario 1.

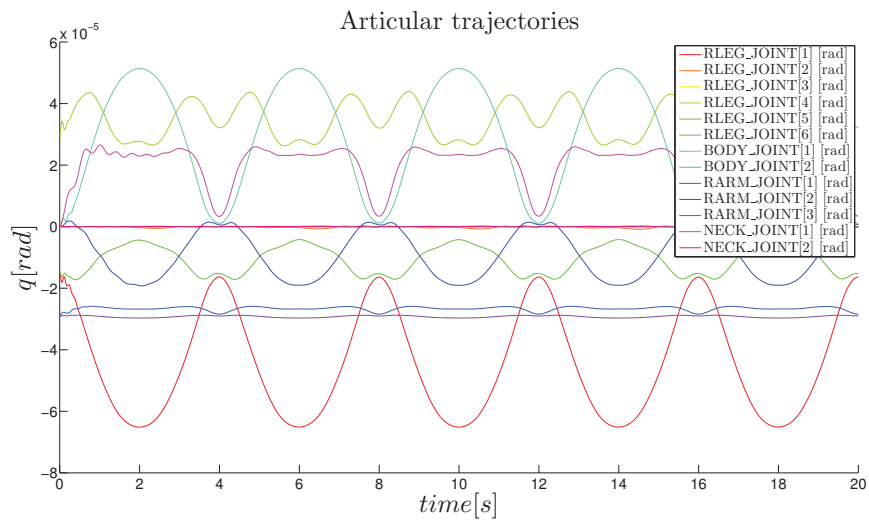


Figure 4.7: Évolution des trajectoires articulaires du côté droit du corps (jambe droite, torse, bras droit et cou) pour le scénario 1.

Il est également observable que les trajectoires convergent vers un cycle, ceci est dû au fait que les trajectoires de référence sont périodiques. Ceci est plus visible encore sur la Figure 4.8 où la trajectoire du genou droit en fonction du tangage de la hanche droite à été tracée. La convergence vers le cycle limite y est clairement observable. Au lancement de la trajectoire, on peut observer une phase transitoire qui disparaît au cours du premier cycle.

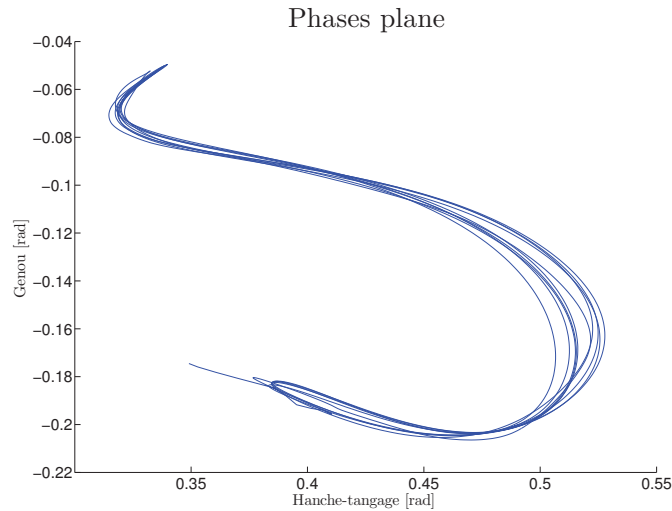


Figure 4.8: Tracé de la trajectoire du genou droit en fonction du tangage de la hanche droite pour le scénario 1.

L'évolution du CoM et du Zero Moment Point (ZMP) est superposée aux empreintes des pieds sur la Figure 4.9. Le ZMP est maintenu proche du centre du polygone de sustentation pendant que le CoM est modifié pour garder une posture stable.

Les observations suivantes peuvent être constatées :

- Le robot produit un mouvement corps-complet ;
- Le mouvement généré converge vers un mouvement périodique ;
- Les pieds ne bougent pas l'un par rapport à l'autre.

Durant l'exécution du mouvement, le modèle humain est stable et produit un mouvement de squat.

#### 4.3.2 Scénario 2 : Apport du stabilisateur sur les marges de stabilité

Le deuxième scénario est une étude de l'apport du stabilisateur sur les marges de stabilité. Pour cela des oscillations d'amplitude croissante sont appliquées en consigne pour provoquer la chute afin de montrer l'apport du stabilisateur.

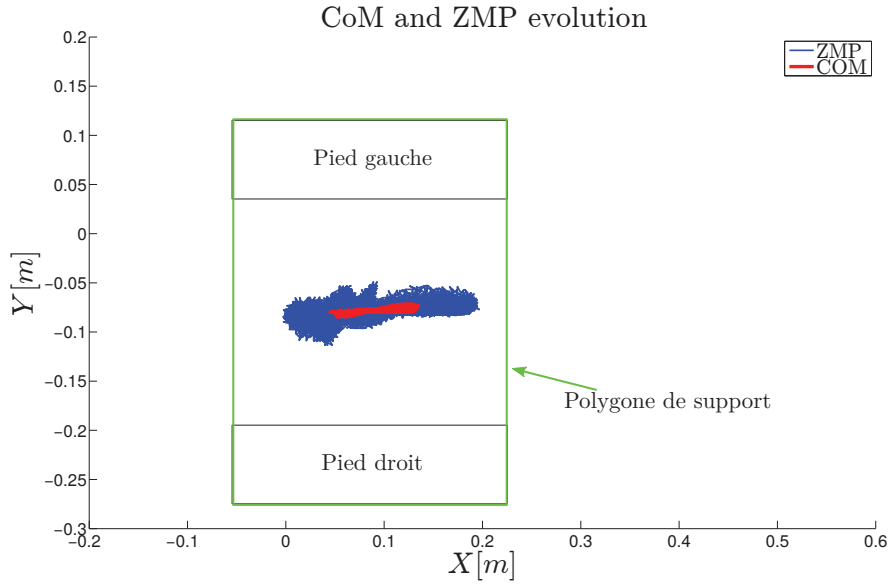


Figure 4.9: Évolution des positions du CoM et du ZMP pour le scénario 1.

#### 4.3.2.1 Objectifs et mise en œuvre

Pour cette étude les trajectoires de références sont constantes à l'exception de la trajectoire sur l'axe antéro-postérieur où une trajectoire sinusoïdale est appliquée. L'amplitude de cette trajectoire a été augmentée de façon régulière jusqu'à la chute du robot comme illustré sur la Figure 4.10. Le robot modélisé est basé sur les mesures d'un sujet humain, comme dans scénario précédent. Ce scénario est réalisé dans deux cas, à savoir avec et sans le stabilisateur pour montrer l'apport et l'efficacité du stabilisateur proposé. La simulation dynamique est effectuée sur un sol plat.

#### 4.3.2.2 Résultats

La consigne du déplacement du CoM selon l'axe antéro-postérieur est calculée à l'aide de l'équation  $\text{CoM}_{d_x} = 0.015 * \exp(t/200) * \cos(\frac{\pi * t}{1.5})$ . Les paramètres de cette équation ont été choisis pour permettre l'observation de la chute que le stabilisateur soit activé ou non. L'amplitude du déplacement du CoM est représentée sur la Figure 4.11.

Les oscillations sans le stabilisateur produisent une chute à 38 secondes pour une amplitude de 0.1559 m. Avec l'utilisation du stabilisateur la chute se produit au bout de 119 secondes pour une amplitude de 0.2725 m soit un apport de 74% sur l'excursion du CoM.

L'évolution de la position cartésienne du CoM, quand le stabilisateur est activé, est représentée sur la Figure 4.12.

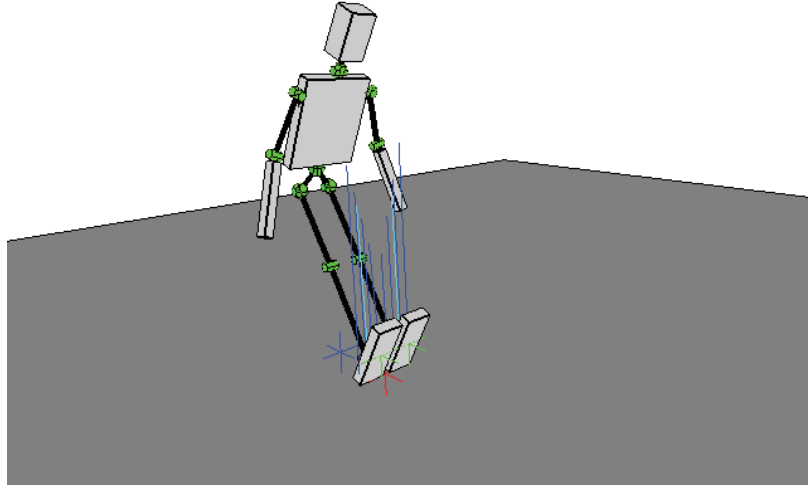


Figure 4.10: Illustration de la chute du robot suite à l'augmentation de l'amplitude des oscillations pour le scénario 2.

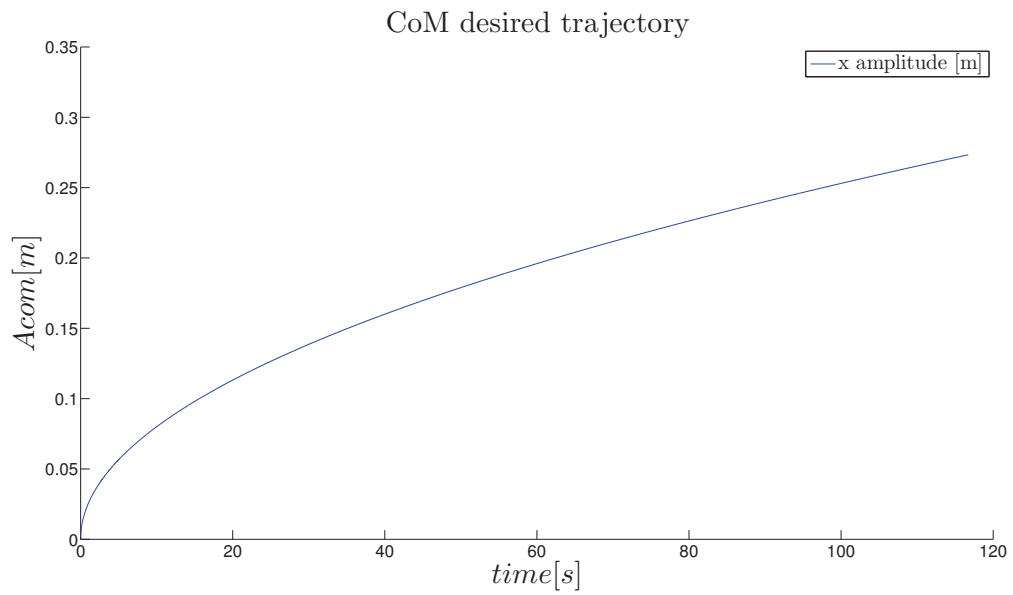


Figure 4.11: Représentation graphique de l'amplitude des oscillations du CoM selon l'axe antéro-postérieur pour le scénario 2.

L'évolution du CoM et du ZMP quand le stabilisateur est activé est superposée aux empreintes des pieds sur la Figure 4.13.



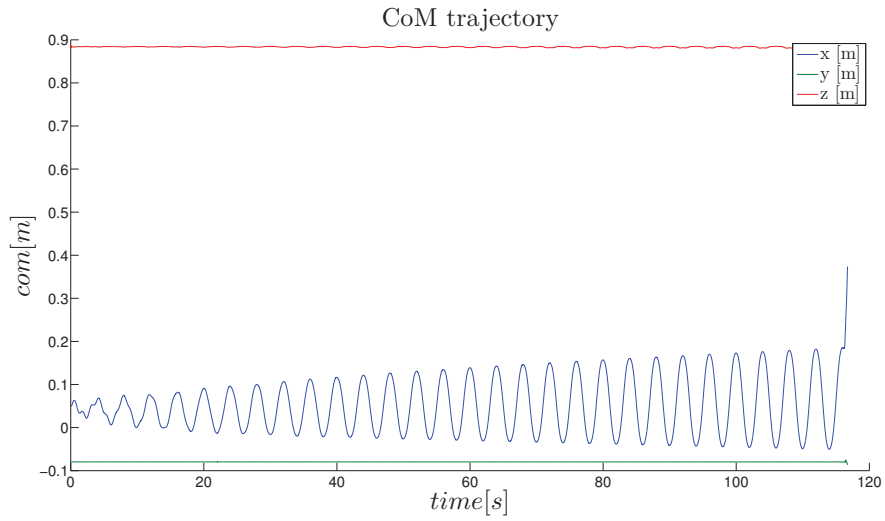


Figure 4.12: Évolution des trajectoires des positions du CoM pour le scénario 2.

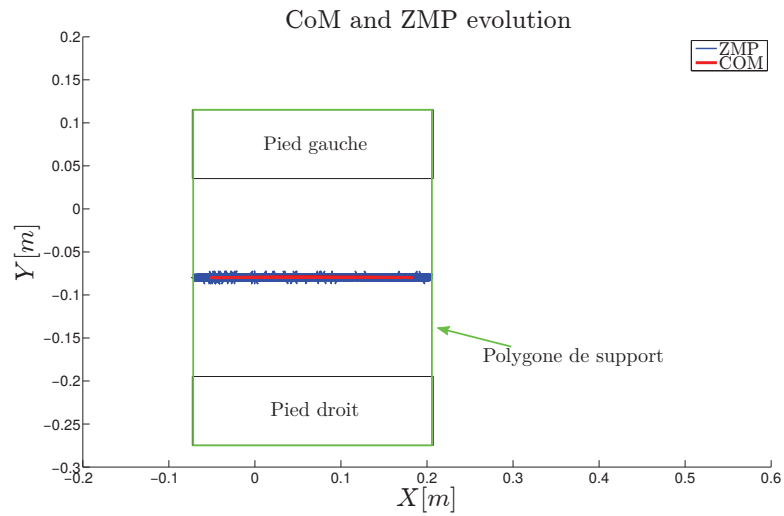


Figure 4.13: Évolution des positions du CoM et du ZMP pour le scénario 2.

Les observations suivantes peuvent être constatées :

- L'augmentation de l'amplitude des oscillations du CoM provoque la chute ;
- Le stabilisateur permet de garder l'équilibre plus longtemps.

Le stabilisateur augmente les marges de stabilité et permet d'améliorer la stabilité lors de mouvements corps-complet.

### 4.3.3 Scénario 3 : Marche quasi-statique sur le robot Sherpa

Le troisième scénario correspond à une marche quasi-statique du robot Sherpa présenté dans la section 5.2.1. Le robot Sherpa est lourd (60 kg) et fragile, dissuadant une approche essai-erreur où les chutes peuvent avoir de graves conséquences sur la partie mécanique du robot. Cette marche a été générée pour être sûr de la stabilité du mouvement avant l'exécution en temps-réel sur le robot.

#### 4.3.3.1 Objectifs et mise en œuvre

La simulation dynamique du robot Sherpa est effectuée sur un sol horizontal plat comme représenté sur la Figure 4.14. Le scénario de marche comporte marche 4 pas. Les trajectoires de référence sont des interpolations entre des postures stables. Le robot fait des pas de 20 cm.

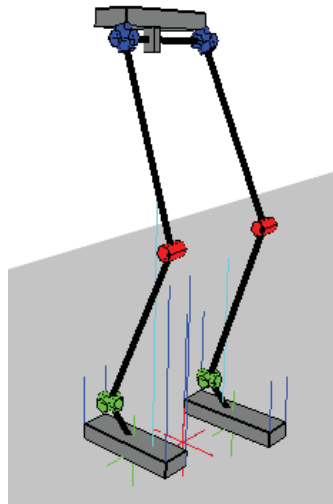


Figure 4.14: Illustration du robot Sherpa pendant une marche quasi-statique pour le scénario 3.

#### 4.3.3.2 Résultats

L'évolution des trajectoires articulaires est représentée sur la Figure 4.15. Le mouvement généré sollicite une majorité des ddls pour produire la marche du robot comme le montre la Figure 4.15. Il est également observable que le mouvement généré tend rapidement vers un mouvement périodique.

L'évolution des positions cartésiennes du CoM est représentée sur la Figure 4.16.

L'évolution du CoM et du ZMP est superposée aux empreintes des pieds sur la Figure 4.17.

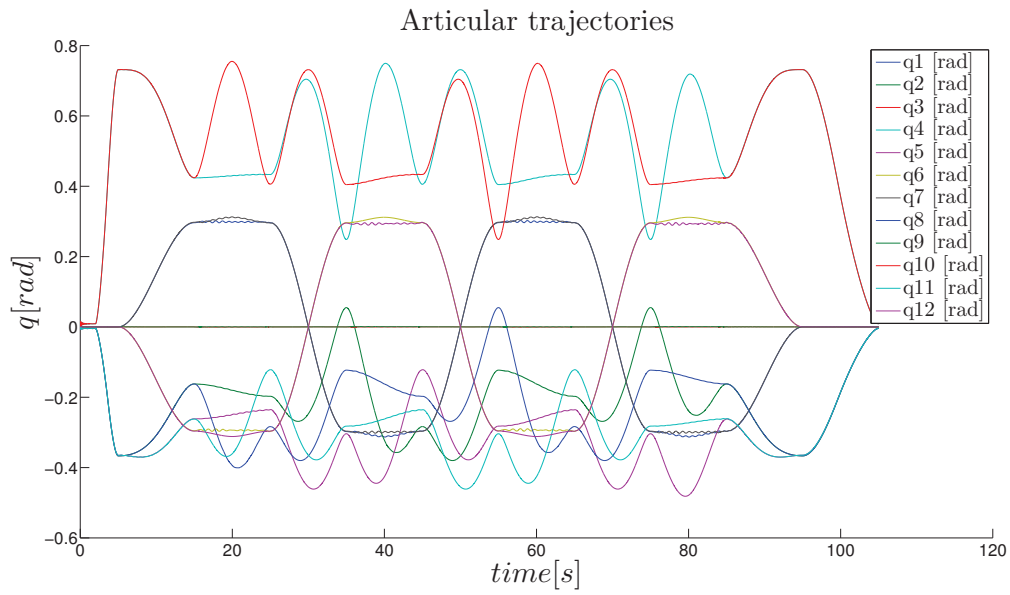


Figure 4.15: Évolution des trajectoires articulaires pour le scénario 3.

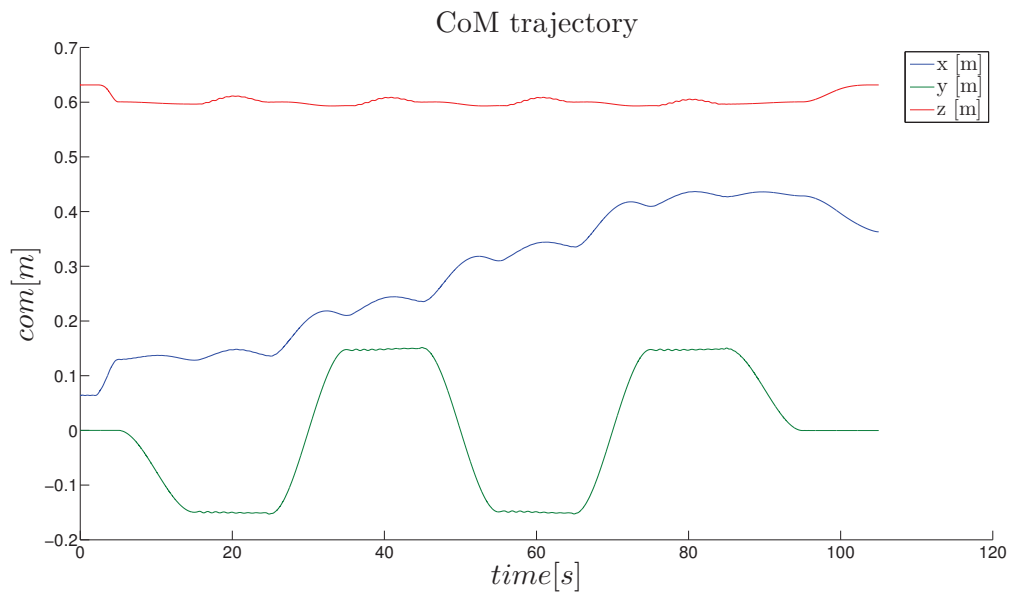


Figure 4.16: Évolution de la position du CoM pour le scénario 3.

Les observations suivantes peuvent être déduites :

- Le robot produit une marche quasi-statique stable à l'aide des trajectoires de référence et du stabilisateur ;
- Conformément au principe de la marche quasi-statique, le CoM et le ZMP sont confondus.

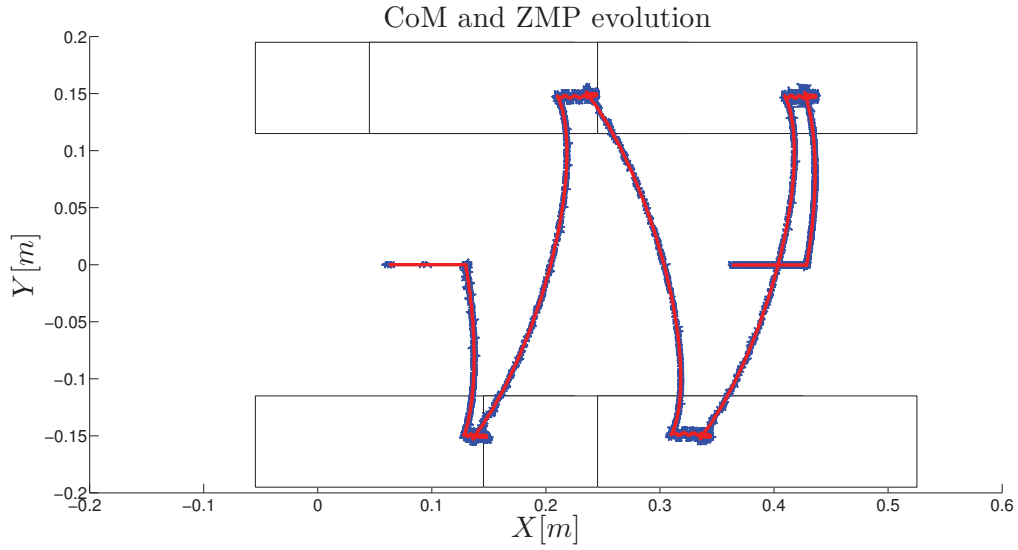


Figure 4.17: Évolution des positions du CoM et du ZMP pour le scénario 3.

Le robot garde des trajectoires stables. Le schéma de contrôle du robot nous permet donc de générer une marche bipède quasi-statique stable pour déplacer le robot.

#### 4.3.4 Scénario 4 : Marche dynamique sur le robot HOAP-3

Le quatrième scénario est celui d'une marche dynamique du robot HOAP-3 sur un sol plat. Ce scénario permet de visualiser la simulation cinématique du mouvement afin de vérifier l'allure générale de la marche avant de l'exécuter en temps-réel sur le robot.

##### 4.3.4.1 Objectifs et mise en œuvre

La simulation cinématique du robot HOAP-3 est effectuée sur un sol horizontal plat, sans obstacles, comme illustré sur la Figure 4.18. Le robot marche pendant 6 pas. Les trajectoires de référence du centre de masse et des pieds sont issues d'un modèle de pendule inversé linéaire 3D (3DLIPM). Le mouvement généré est un mouvement de marche dynamique. Le robot fait des pas de 6 cm.

La simulation cinétique permet de reproduire les trajectoires sur le robot, sans pour autant calculer la stabilité afin de vérifier l'allure générale du mouvement.

#### 4.3.4.2 Résultats

Le mouvement de marche produit est observable sur la Figure 4.18.

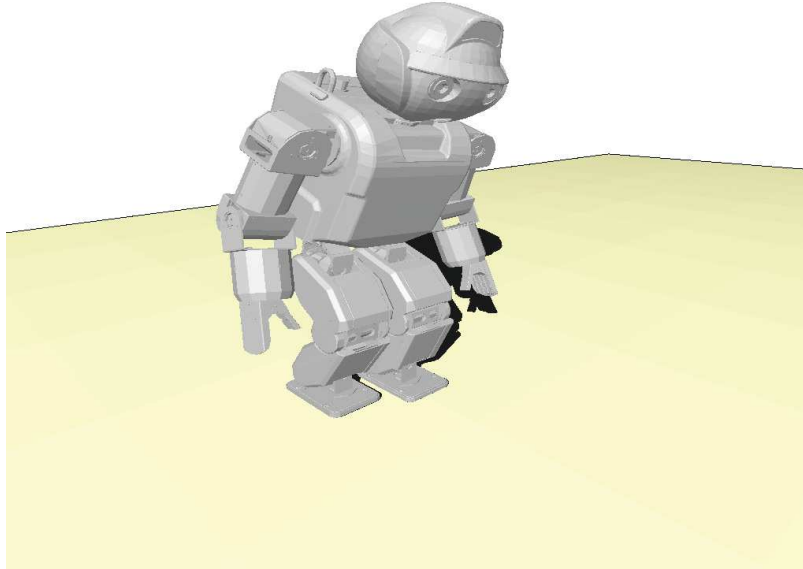


Figure 4.18: Vue du robot HOAP-3 pendant une marche dynamique en simulation cinématique pour le scénario 4.

L'évolution des trajectoires articulaires du côté droit est représenté sur la Figure 4.19.

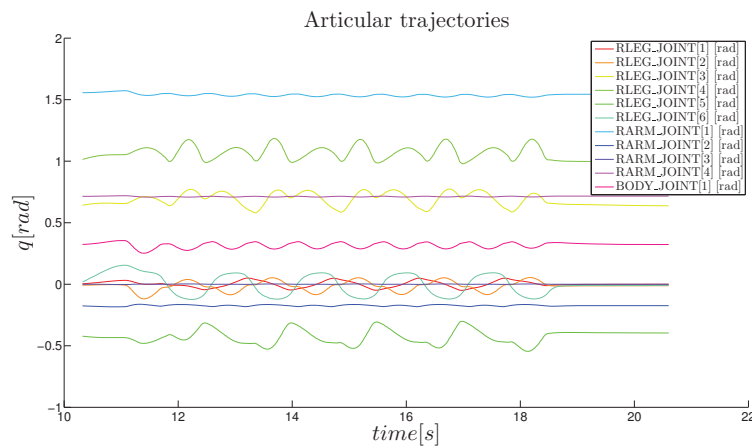


Figure 4.19: Évolution des trajectoires articulaires du côté droit pour le scénario 4.

Les observations suivantes peuvent être déduites :

- La simulation cinétique permet de prévoir l'allure générale de la marche ;
- elle ne permet pas de garantir la stabilité.

## 4.4 Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter le simulateur développé dans le cadre de cette thèse.

La première partie du chapitre a été consacrée à la présentation du simulateur et aux choix technologiques implémentés pour réaliser les simulations. Dans la seconde partie du chapitre, les principaux résultats obtenus grâce au simulateur développé ont été présentés. Pour cela, quatre scénarios de validation ont été proposés :

- mouvement de squat sur un modèle humain ;
- étude de l'apport du stabilisateur sur les marges de stabilité ;
- marche quasi-statique sur le robot Sherpa ;
- marche dynamique sur le robot HOAP-3.

Ces différents scénarios ont laissé percevoir les possibilités du simulateur dédié à la simulation cinétique ou dynamique, avec de multiples points de contacts, pour étudier la coordination posturale ou des mouvements de marche.

Dans le prochain chapitre, les prototypes de robots utilisés dans cette thèse seront présentés. L'architecture de commande hybride cinématique/dynamique proposée dans le chapitre 3 est implémentée sur ces robots. Les résultats des expérimentations temps-réel seront également présentés.



---

## Plate-formes et validations expérimentales

### Sommaire

---

4.1	Introduction . . . . .	79
4.2	Présentation de la modélisation des robots . . . . .	80
4.3	Résultats de simulations . . . . .	86
4.4	Conclusion . . . . .	97

---

### 5.1 Introduction

Ce chapitre est consacré aux expérimentations en temps-réel sur deux robots afin de montrer l'efficacité de l'approche de commande hybride cinématique/dynamique proposée dans le chapitre 3.

Nous commencerons par une présentation de l'architecture matérielle et logicielle des deux démonstrateurs utilisés pour les expérimentations temps-réel. Par la suite, ces deux démonstrateurs seront utilisés dans différents scénarios afin de montrer les performances de l'approche de commande proposée. Ces scénarios incluent, entre autres, l'adaptation de la posture à l'inclinaison du sol ou la marche sur sol irrégulier par exemple.



## 5.2 Description des plate-formes expérimentales

Cette partie présente les deux démonstrateurs utilisés dans les expérimentations temps-réel de la commande hybride cinématique/dynamique proposée. Ces deux démonstrateurs sont :

- Le robot bipède Sherpa ;
- Le robot humanoïde HOAP-3.

Les différentes architectures des robots permettent d'explorer les particularités de notre commande proposée. Le robot bipède Sherpa permet des expérimentations utilisant uniquement le bas du corps, pour explorer les effets d'un nombre limité de degré de liberté (ddl). Le robot humanoïde HOAP-3, quant à lui, permet des expérimentations utilisant la totalité du corps pour des mouvements corps-complet.

Une description technique de chacun des démonstrateurs sera présentée dans cette partie. Chaque description contient une présentation de la plate-forme expérimentale, une description de la structure cinématique (articulations), matérielle (actionneurs, capteurs) et de l'architecture logicielle propre au démonstrateur.

### 5.2.1 Le robot bipède Sherpa

#### 5.2.1.1 Présentation du robot

Le robot bipède Sherpa, illustré sur la Figure 5.1, a été développé et construit entre 2007 et 2011 au LIRMM dans le cadre du projet national ANR-06-BLAN-0244 SHERPA. Ce robot pèse 60 kg, mesure 120 cm et dispose de 12 ddls.

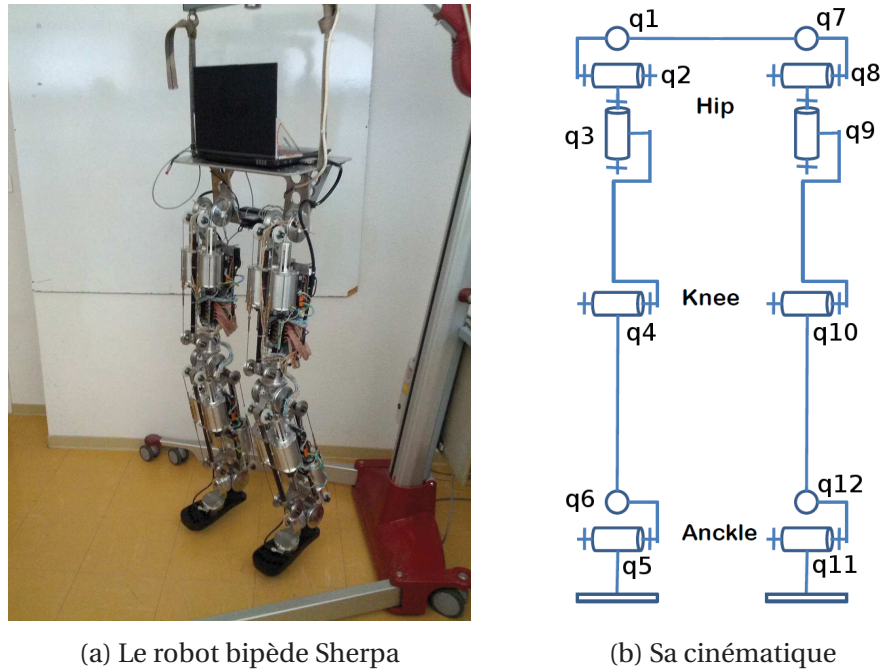
Le nom de ce robot vient des Sherpas, membres d'un peuple originaire du Tibet et habitant dans les Himalayas du Nepal. Leur particularité est d'aider les membres des expéditions alpines à gravir le mont Everest en les guidant et en portant leurs affaires. En effet, ce robot est conçu pour porter des charges tout en marchant dans un environnement conçu pour les humains [Olaru *et al.*, 2009].

#### 5.2.1.2 Structure cinématique

Le robot bipède Sherpa est constitué d'une hanche reliant deux jambes, seul le bas du corps d'un humain est reproduit.

La structure cinématique du robot se compose de 12 ddls disposés de la manière suivante :

- 6 ddls par jambes ;
  - dont 3 ddls à la hanche ;
  - 1 ddl au genou ;



(a) Le robot bipède Sherpa

(b) Sa cinématique

Figure 5.1: Le robot bipède Sherpa est notre premier démonstrateur pour les expérimentations temps-réel.

- 2 ddl à la cheville ;

Le placement précis de ces articulations et de leur orientation est illustré sur la Figure 5.1-(b).

Une étude menée par l'Institut des Sciences du Mouvement (ISM) à Marseille dans le cadre du projet ANR SHERPA a démontré que six articulations par jambes suffisent à reproduire un mouvement proche de la locomotion humaine [Olaru *et al.*, 2009].

### 5.2.1.3 Structure matérielle

Le robot bipède Sherpa est équipé de codeurs absolus magnétiques au niveau de chaque ddl. Le robot dispose aussi d'un accéléromètre trois-axes, d'un gyroscope trois-axes pour déterminer sa pose dans l'espace. Ceci est complété par un capteur de forces six-axes par pied pour la mesure des efforts de contact avec le sol.

Le robot dispose d'actionneurs transparents. Ils sont constitués de moteurs électriques à fort couple, créés sur mesure, ainsi que de réducteurs (constitués de vis à grand pas) et d'un système de transmission par câbles pour pouvoir générer les couples nécessaire à la

locomotion tout en étant totalement réversibles, de faible inertie, de faibles frottements et peu de jeu.

Ces actionneurs transparents sont utilisés dans une transmission mécanique parallèle, permettant d'additionner les efforts moteurs afin d'obtenir de forts couples et grandes vitesses sur chaque articulation.

Le robot est constitué de six modules d'actionnement comportant chacun deux actionneurs transparents agissant sur deux ddl par la transmission mécanique parallèle. Cette architecture permet de réduire les coûts et de faciliter la maintenance.

#### 5.2.1.4 Architecture logicielle

L'ordinateur portable embarqué utilise RTX™, une extension pour Windows™ afin de le rendre temps-réel. La boucle de contrôle permettant de commander les moteurs est cadencée à 200 Hz.

Le robot est programmé en langage C. Les interfaces de bas niveau avec le robot ont été développées par Michel Benoit, un ingénieur de recherche au LIRMM. L'extension RTX™ impose d'utiliser l'interface de développement Visual C++ 6.0 illustrée sur la Figure 5.2. Les programmes sont compilés et exécutés en temps-réel sur l'ordinateur embarqué.

### 5.2.2 Le robot humanoïde HOAP-3

#### 5.2.2.1 Présentation du robot

Le robot humanoïde HOAP-3 est le troisième robot d'une série créée par Fujitsu Automation Limited. HOAP est l'abréviation d'humanoïde pour une plate-forme d'architecture ouverte (*Humanoid for Open Architecture Platform*). Il a été disponible à la vente dès 2005. D'une taille relativement petite, HOAP-3 pèse 8.8 kg, mesure 60 cm et dispose de 28 ddls.

Utilisé dans la recherche par de nombreux laboratoires, 130 unités ont été distribuées de par le monde [Uchiyama *et al.*, 2011].

#### 5.2.2.2 Structure cinématique

La structure cinématique du robot se compose de 28 ddls disposés de la manière suivante :

- 6 ddls par jambes ;
  - dont 3 ddls à la hanche ;
  - 1 ddl au genou ;
  - 2 ddls à la cheville ;
- 5 ddls par bras ;

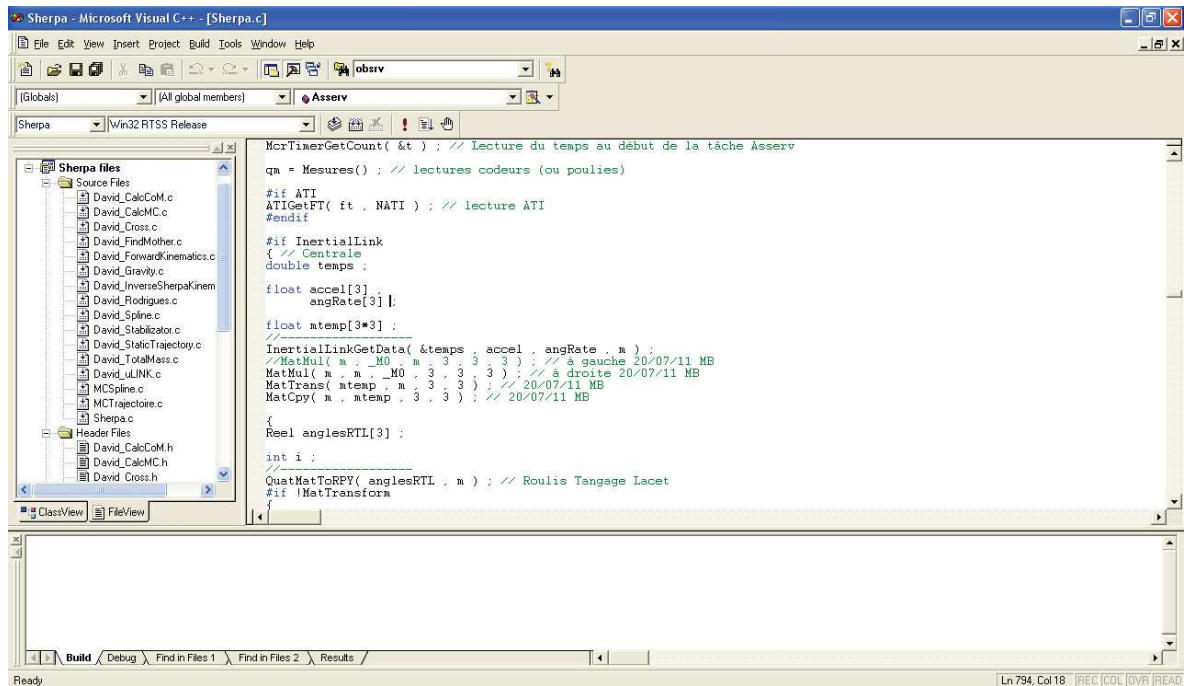


Figure 5.2: Vue de l'interface de développement Visual C++ 6.0 utilisée pour le bipède Sherpa.

- dont 3 ddl à l'épaule ;
- 1 ddl au coude ;
- 1 ddl au poignet ;
- 1 ddl au tronc ;
- 1 ddl par main ;
- 3 ddl au cou.

Le placement précis de ces articulations est illustré sur la Figure 5.4.

Les dimensions des membres et les débattements articulaires sont données dans l'annexe B.

Les débattements articulaires de ce robot permettent de reconstruire des mouvements corps-complet semblables aux mouvements d'un humain.

### 5.2.2.3 Structure matérielle

Le robot humanoïde HOAP-3 est équipé de codeurs optiques incrémentaux sur chaque ddl d'une résolution de 0.01 degrés. Le robot dispose aussi d'un accéléromètre trois-axes, d'un gyroscope trois-axes pour déterminer sa pose dans l'espace. Ceci est complété par



Figure 5.3: Vue du robot humanoïde HOAP-3, notre second démonstrateur.

quatre capteurs de force résistifs par pied pour la mesure des forces de contact avec le sol et deux capteurs de force au niveau des mains pour aider à la préhension d'objets.

Le robot dispose d'un retour en stéréo-vision grâce aux deux caméras placées au niveau des yeux du robot et d'une mesure de distance à l'aide d'un capteur infrarouge.

Le robot dispose d'un microphone et d'un haut parleur pour communiquer et comprendre des ordres.

Le robot dispose de moteurs équipés de micro-contrôleurs intégrés pour un asservissement rapide de la position articulaire à l'aide d'une boucle PID à haute fréquence.

#### 5.2.2.4 Architecture logicielle

Le robot utilise un PC embarqué équipé d'un OS Linux temps-réel, dont la boucle de commande est cadencée à 1 ms. Le robot se programme en langage C.

Le robot peut être utilisé selon deux différents modes :

- mode local
- mode distant

Si le robot est en mode local, cela signifie que le code est embarqué, compilé et exécuté sur le robot. Si le robot est en mode distant, cela signifie que le code est compilé et

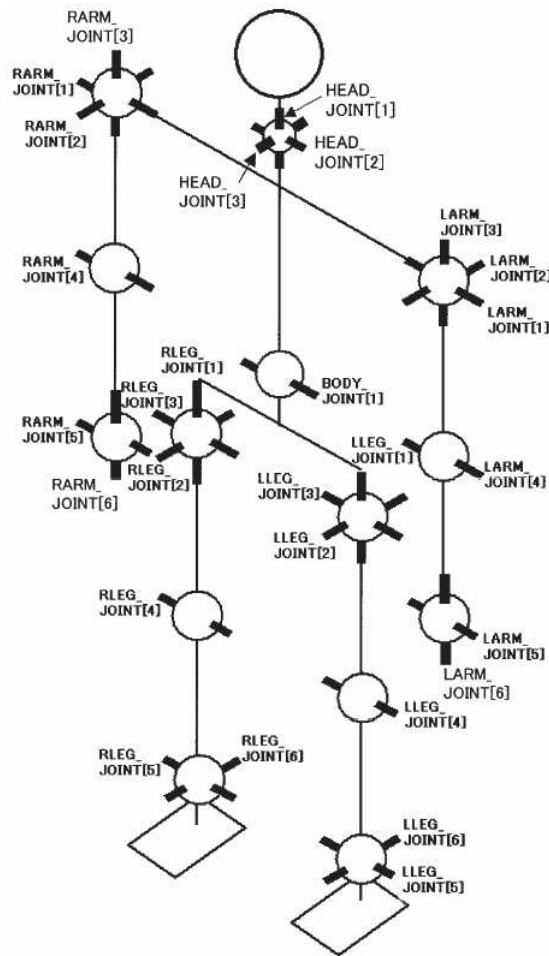


Figure 5.4: Structure cinématique du robot humanoïde HOAP-3.

exécuté à partir d'un ordinateur distant. L'ordinateur distant est un ordinateur de bureau communiquant avec l'ordinateur embarqué du robot en utilisant une connexion filaire ou un réseau Wifi. La deuxième solution a été retenue car elle est plus pratique à mettre en œuvre et elle permet d'utiliser de plus grandes ressources informatiques.

En pratique, un client TCP/IP léger codé en python est exécuté sur l'ordinateur embarqué du robot. Ce client lit et modifie directement les parties de la mémoire allouées aux processus temps-réels, ce qui permet une communication très rapide. Sur l'ordinateur distant, la commande est calculée à partir de la pose courante puis envoyée au robot toutes les millisecondes. L'ordinateur embarqué du robot envoie les positions articulaires, les mesures des capteurs de forces et les mesures inertielles à l'ordinateur distant et reçoit, en échange, les positions articulaires désirées.

## 5.3 Résultats d'expérimentations

L'architecture de commande hybride cinématique/dynamique proposée dans le chapitre 3 a été implémentée sur deux démonstrateurs pour réaliser cinq scénarios d'expérimentations en temps-réel, à savoir :

- Scénario 1 : génération de mouvement de squat cyclique ;
- Scénario 2 : adaptation de la posture à l'inclinaison du sol ;
- Scénario 3 : marche sur un sol horizontal ;
- Scénario 4 : marche sur un sol irrégulier ;
- Scénario 5 : marche corps-complet.

Les résultats obtenus dans chacun de ces scénarios sont présentés et discutés ci-après.

### 5.3.1 Scénario 1 : Mouvement de squat cyclique

Le premier scénario est celui d'un mouvement de squat. Ce scénario a été réalisé sur le robot Sherpa et sur le robot HOAP-3 afin de démontrer la généricité du schéma de commande proposé et sa capacité à générer des mouvements corps-complet stables.

#### 5.3.1.1 Objectifs et mise en œuvre

Les robots sont démarrés sur un sol horizontal plat. La trajectoire de référence des pieds est constante pour maintenir les deux pieds au sol. La trajectoire de référence du Centre de masse (CoM) est une sinusoïde sur l'axe vertical, afin de monter et descendre le CoM désiré comme illustré sur la Figure 5.5. Les robots produisent alors un mouvement comparable à celui du squat.

#### 5.3.1.2 Résultats

##### Application sur le bipède Sherpa.

Le robot bipède Sherpa produit le mouvement de squat comme illustré sur la Figure 5.6.

L'évolution des trajectoires articulaires est représentée sur la Figure 5.7. Sur cette figure, les trajectoires de 5 à 10 secondes caractérisent la phase d'initialisation du robot. En effet, l'objectif de cette phase consiste à asservir chaque articulation du robot afin d'aller de la position d'initialisation vers la position de confort du robot

Les trajectoires de 10 à 15 secondes correspondent à la phase d'activation du contrôle proposé. Durant cette phase, les trajectoires demandées pour le CoM et les pieds sont constantes, et le stabilisateur est également initialisé.

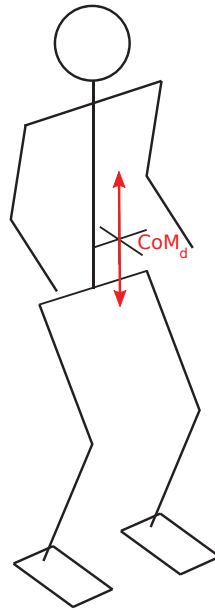


Figure 5.5: La trajectoire de référence du CoM est une sinusoïde sur l'axe vertical pour le scénario 1. Ceci génère un mouvement de squat sur les robots.

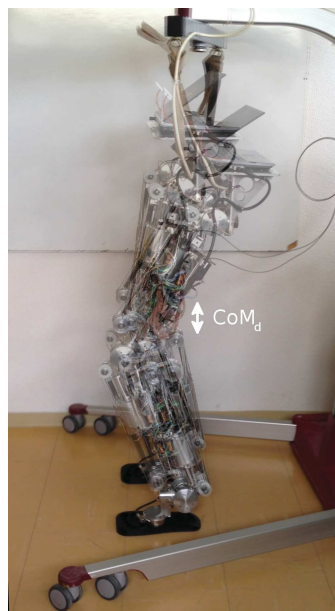


Figure 5.6: Mouvements de squat appliqués sur le robot Sherpa pour le scénario 1.

De 15 à 45 secondes, le robot effectue le mouvement de squat désiré grâce à l'approche de commande proposée. Les trajectoires de référence du CoM suivent une sinusoïde sur l'axe vertical, pendant que les trajectoires des pieds sont constantes. L'orientation de la



hanche est gardée constante, ce qui évite la chute de l'ordinateur de commande qui est posé sur la hanche.

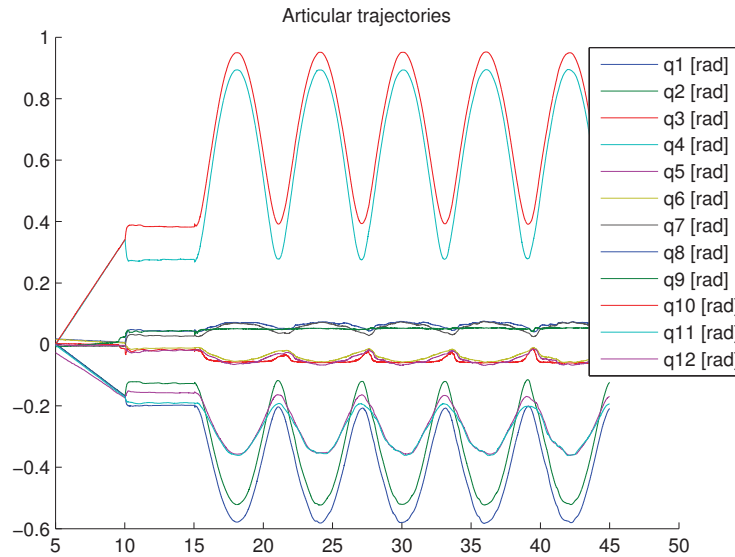


Figure 5.7: Évolution des trajectoires articulaires pour le scénario 1.

Le mouvement généré utilise la totalité des ddls comme le montre la figure 5.7. Le mouvement du CoM désiré suit une sinusoïde sur l'axe vertical, mais les ddls permettant le déplacement du robot dans le plan frontal (q1, q3, q6, q7, q9 et q12 visibles sur la Figure 5.1(b)) sont également sollicités. Cela est dû au fait que les masses des segments ne sont pas parfaitement symétriques d'une jambe à l'autre et sur la hanche. Le stabilisateur produit alors un mouvement dans le plan frontal pour maintenir l'équilibre.

Le robot produit un mouvement stable, où la trajectoire du CoM est une sinusoïde sur l'axe vertical. Le mouvement produit est semblable au mouvement de squat produit par un humain en utilisant les membres inférieurs.

### Application sur le robot humanoïde HOAP-3.

Le robot humanoïde HOAP-3 produit le mouvement de squat comme illustré sur la Figure 5.8 suite à l'application des consignes désirées sur les objectifs, à savoir : la trajectoire de référence des pieds est constante pour maintenir les deux pieds au sol et la trajectoire de référence du CoM est une sinusoïde sur l'axe vertical. L'objectif de maintien de l'orientation du buste est désactivé pour permettre un mouvement plus naturel, proche de celui produit par un humain.

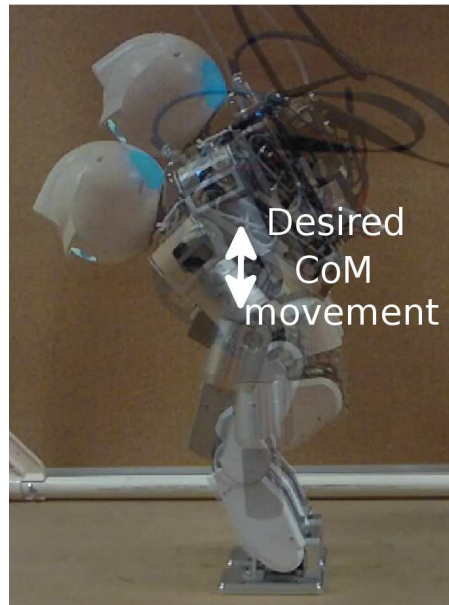


Figure 5.8: Illustration du mouvement produit pour le scénario 1. Le mouvement de squat est le résultat de l'application, sur le robot HOAP-3, d'une sinusoïde sur l'axe vertical de la trajectoire désirée du CoM.

L'évolution des trajectoires articulaires est représentée sur la Figure 5.9. Sur cette figure, le robot effectue le mouvement de squat désiré grâce à l'approche de commande proposée. Les trajectoires de référence du CoM suivent une sinusoïde sur l'axe vertical, pendant que les trajectoires des pieds sont constantes.

Le mouvement généré utilise une grande majorité des ddls comme le montre la figure 5.9. En effet, le mouvement du CoM désiré suit une sinusoïde sur l'axe vertical, les ddls permettant le déplacement du robot dans le plan frontal sont alors peu sollicités.

Il est également observable que le mouvement généré tend rapidement (2-3 flexions) vers un mouvement périodique. Ceci est plus visible encore sur la Figure 5.10 où la trajectoire du genou droit en fonction du tangage de la hanche droite a été tracé. La convergence vers le cycle limite y est clairement observable.

Le robot produit un mouvement stable, où la trajectoire du CoM est une sinusoïde sur l'axe vertical. Le mouvement produit un mouvement de squat utilisant le corps complet.

Ce scénario est réalisé sur les deux robots malgré leurs différences de taille et de structure cinématique. Le contrôle proposé est donc facilement transposable d'un robot à un autre même si des différences de capteurs, actionneurs, moteurs et logiciels de commande existent entre les robots.

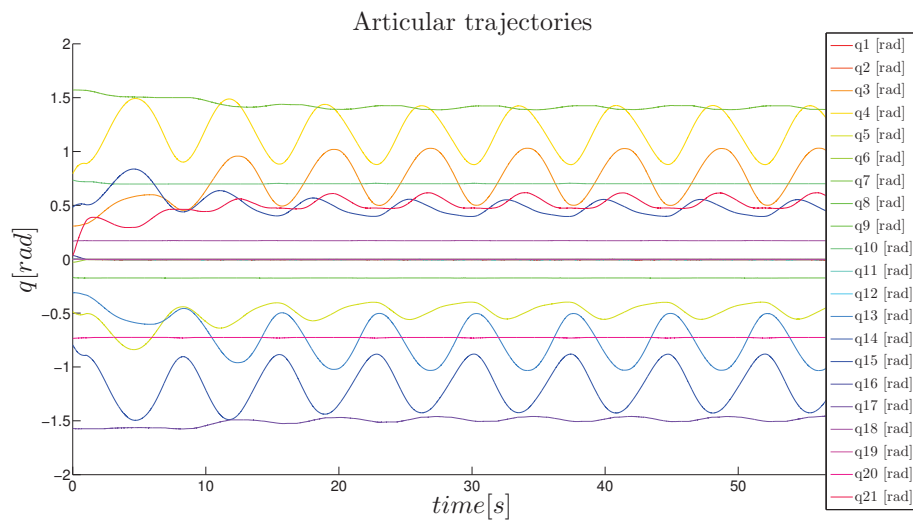


Figure 5.9: Évolution des trajectoires articulaires pour le scénario 1.

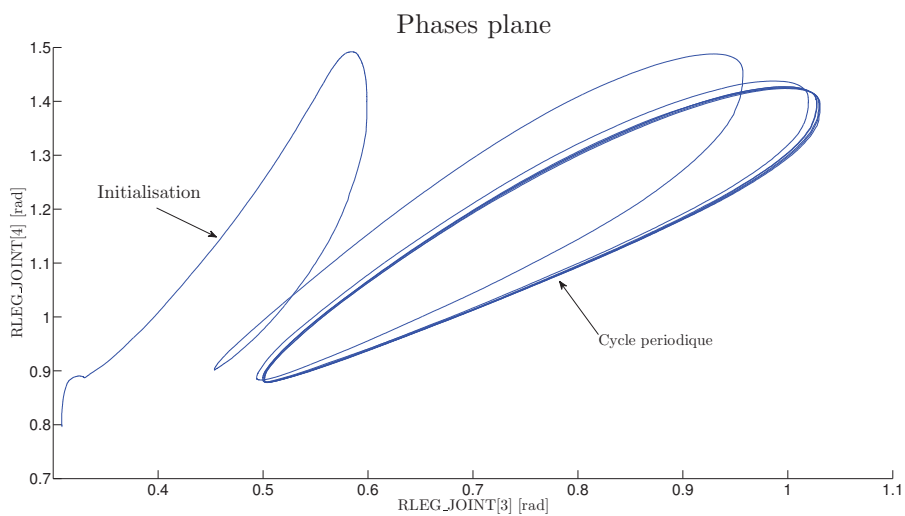


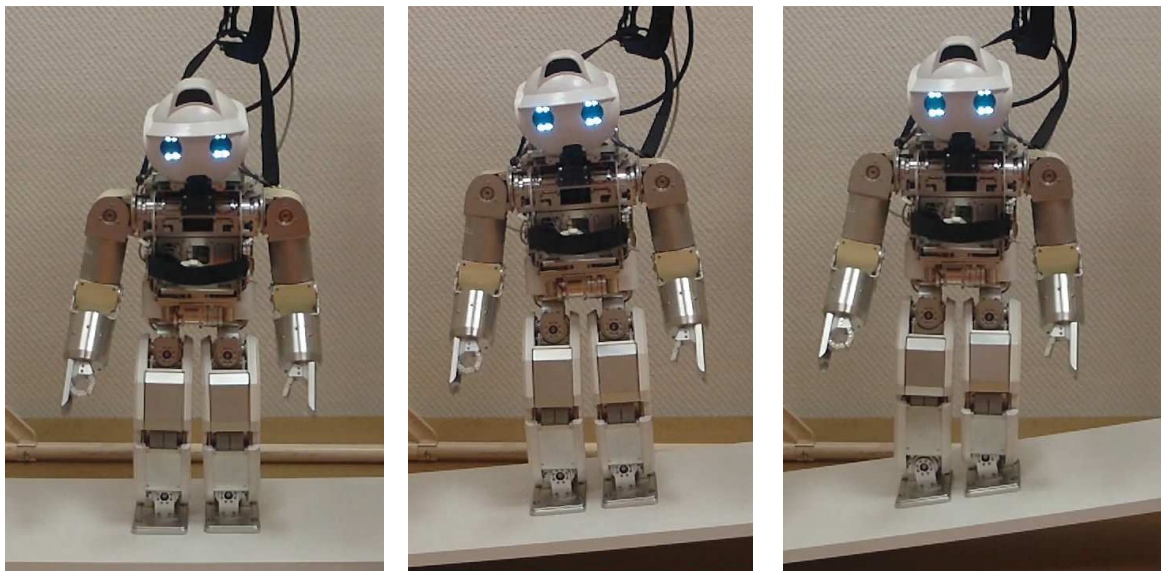
Figure 5.10: Tracé de la trajectoire du genou droit en fonction du tangage de la hanche droite pour le scénario 1.

### 5.3.2 Scénario 2 : Adaptation de la posture envers une inclinaison du sol

Le deuxième scénario est celui de l'adaptation de la posture du robot HOAP-3 en fonction de l'inclinaison du sol. Ce scénario illustre la réaction du schéma de contrôle face aux perturbations du Zero Moment Point (ZMP) suite à une variation de l'inclinaison du sol.

#### 5.3.2.1 Objectifs et mise en œuvre

L'expérimentation commence avec le robot HOAP-3 posé sur une planche comme illustré sur la Figure 5.11(a). Les trajectoires de référence sont constantes pour produire une pose immobile. Les seuls mouvements possibles sont alors ceux provoqués par la partie stabilisation non linéaire de notre schéma de contrôle. La planche est ensuite progressivement inclinée jusqu'à 35 degrés comme illustré sur la Figure 5.11.



(a) Mise en œuvre du scénario 2. (b) Début de l'inclinaison du sol. (c) Large amplitude d'inclinaison du sol.

Figure 5.11: Adaptation de la posture du robot aux variations de l'inclinaison du sol en temps-réel pour le scénario 2.

#### 5.3.2.2 Résultats

L'évolution des trajectoires articulaires du côté droit du robot HOAP-3 (jambe droite, torse, bras droit et cou) est représentée sur la Figure 5.12. Sur cette figure, les trajectoires de 0 à 3 secondes caractérisent la phase d'initialisation du robot. En effet, l'objectif de cette

phase consiste à asservir chaque articulation du robot afin d'aller de la position d'initialisation vers la position de confort du robot. De 3 à 38 secondes, le contrôle proposé est actif, les trajectoires demandées pour le CoM et les pieds sont constantes.

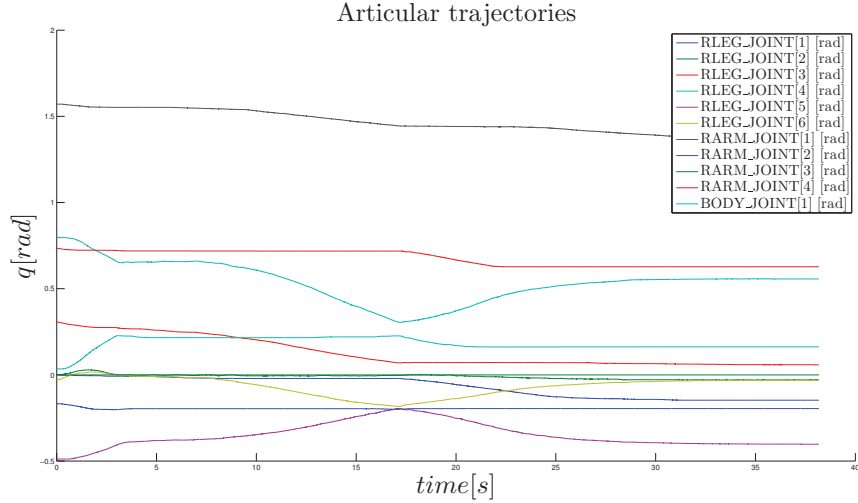


Figure 5.12: Évolution des trajectoires articulaires du côté droit du robot HOAP-3 (jambe droite, torse, bras droit et cou) pour le scénario 2.

Le stabilisateur produit le mouvement observable en modifiant la position du CoM afin de maintenir l'équilibre du robot. Le mouvement produit modifie les trajectoires articulaires de façon à maintenir le robot droit comme illustré sur la figure 5.11(c).

L'évolution de la position cartésienne du CoM dans le référentiel du pied droit est représentée sur la Figure 5.13. La modification de la trajectoire selon l'axe transverse  $y$  est clairement observable. Le CoM retourne à sa position initiale à la fin de la perturbation.

L'évolution de la position cartésienne du pied gauche dans le référentiel du pied droit est représenté sur la Figure 5.14. Les pieds sont effectivement maintenus immobiles entre eux. C'est une condition nécessaire pour maintenir le contact avec le sol et ne pas rompre la boucle cinématique formée par les deux jambes et le sol.

L'évolution du CoM et du ZMP est tracée superposée aux empreintes des pieds sur la Figure 5.15. Le ZMP est maintenu proche du centre du polygone de sustentation pendant que le CoM est modifié pour garder une posture stable.

Le robot adapte sa posture à l'inclinaison du sol pour garder une posture stable. Le buste est gardé droit par rapport à la gravité. Le schéma de contrôle du robot est donc robuste à ce type de perturbations.

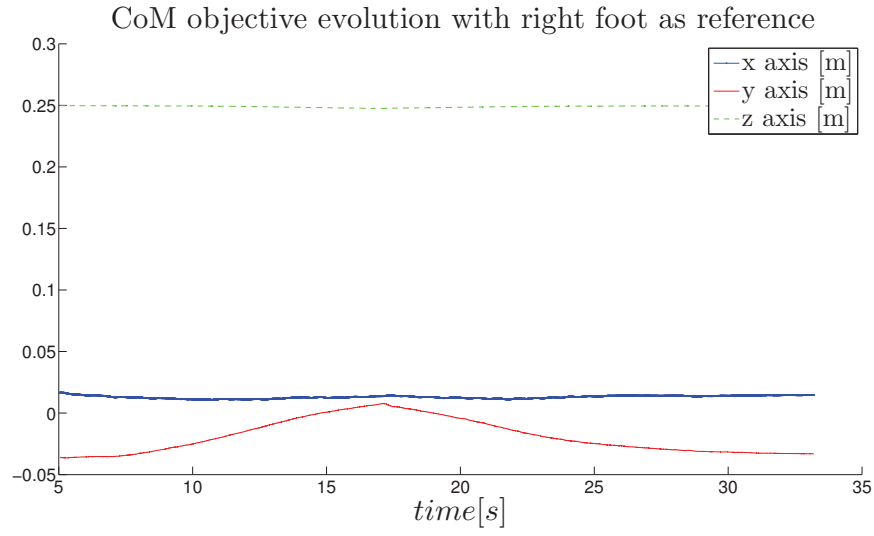


Figure 5.13: Évolution de la position du CoM dans le référentiel du pied droit pour le scénario 2.

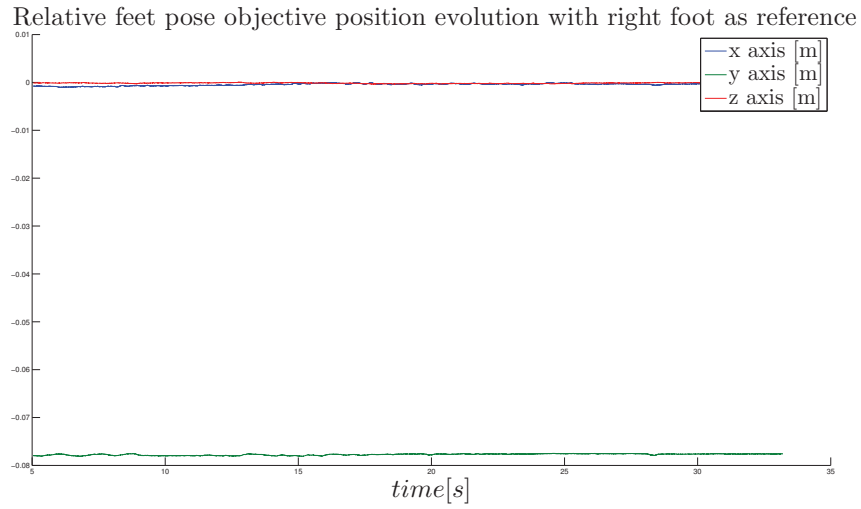


Figure 5.14: Évolution de la position du pied gauche dans le référentiel du pied droit pour le scénario 2.

### 5.3.3 Scénario 3 : Marche sur un sol horizontal

Le troisième scénario concerne la réalisation d'une tâche de marche du robot HOAP-3 sur un sol plat horizontal. Ce scénario sert à illustrer la capacité du schéma de contrôle

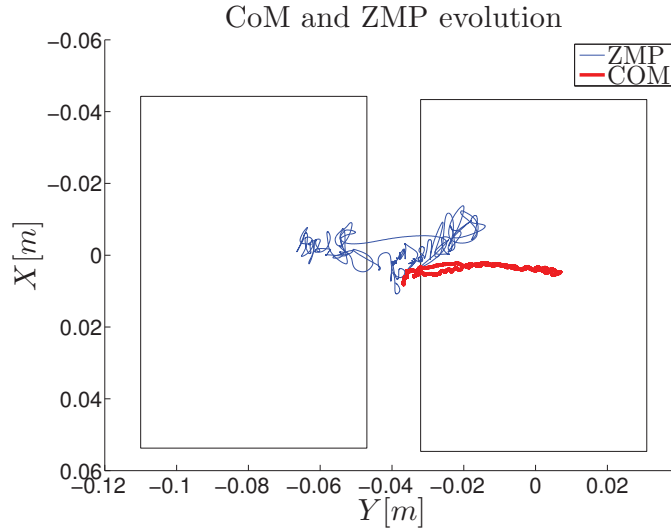


Figure 5.15: Évolution des positions du CoM et du ZMP pour le scénario 2.

à générer des trajectoires de marche dynamiquement stables en rejetant des éventuelles perturbations.

### 5.3.3.1 Objectifs et mise en œuvre

L'expérimentation commence avec le robot HOAP-3 posé sur un sol horizontal plat, sans obstacle, comme illustré sur la Figure 5.16. Le robot doit effectuer dix pas de marche en ligne droite. Les trajectoires de référence du centre de masse et des pieds sont issues du modèle de pendule inversé linéaire 3D (3DLIPM). Le robot fait des pas de 6 cm.

### 5.3.3.2 Résultats

L'évolution des trajectoires articulaires du côté droit du robot HOAP-3 (jambe droite, torse, bras droit et cou) est représentée sur la Figure 5.17.

Ce scénario comporte trois phases de durées 11, 14 et 5 secondes respectivement : les trajectoires de 0 à 11 secondes caractérisent la phase d'initialisation du robot. En effet, l'objectif de cette phase consiste à asservir chaque articulation du robot afin d'aller de la position d'initialisation vers la position de confort du robot. De 11 à 25 secondes, le contrôle proposé est actif, les trajectoires demandées pour le CoM et les pieds sont issues du 3DLIPM. Ceci permet de produire la marche désirée en renforçant la stabilité dynamique à l'aide du stabilisateur. Les trajectoires de 25 à 30 secondes caractérisent la phase d'arrêt du robot. Le contrôle proposé est toujours actif, mais les trajectoires demandées pour le CoM et les pieds sont constantes.

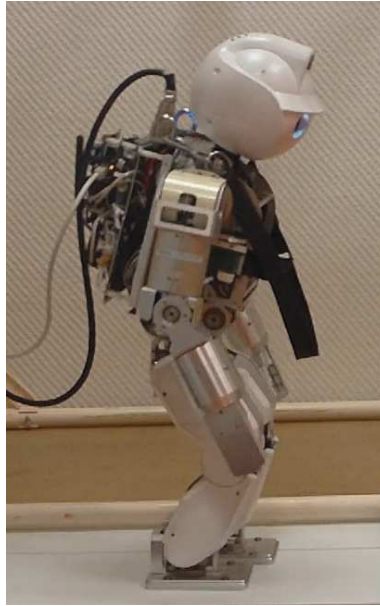


Figure 5.16: Marche du robot HOAP-3 sur sol horizontal pour le scénario 3.

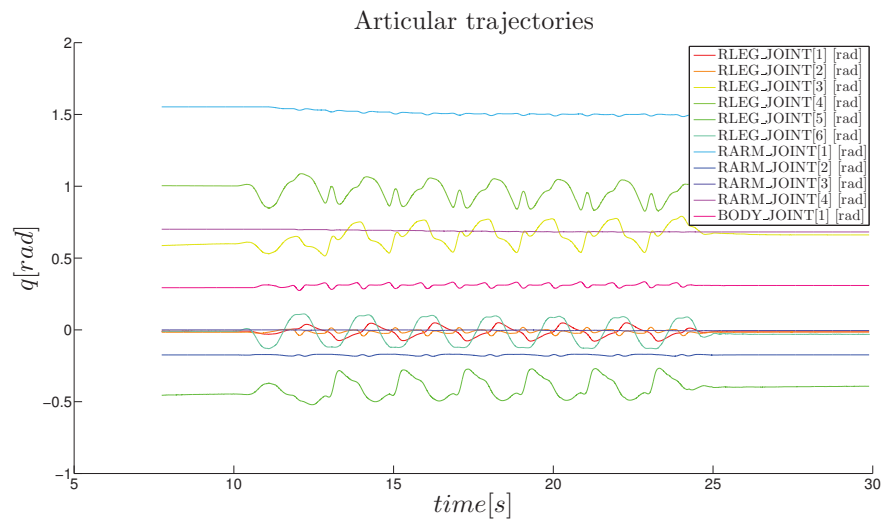


Figure 5.17: Évolution des trajectoires articulaires du côté droit du robot HOAP-3 (jambe droite, torse, bras droit et cou) pour le scénario 3.

Le mouvement généré sollicite une majorité des ddls pour produire la marche du robot comme le montre la Figure 5.17. Il est également observable que le mouvement généré tend rapidement vers un mouvement périodique.



L'évolution de la position cartésienne du CoM dans le référentiel du pied droit est représentée sur la Figure 5.18. Le CoM étant exprimé dans le repère du pied droit, la position initiale et la position finale sont identiques. On peut observer que, selon l'axe antéro-postérieur ( $x$ ), le CoM suit une trajectoire pour être avant ou après le pied selon le cycle de marche. Selon l'axe transverse ( $y$ ), le mouvement correspond à celui du 3DLIPM. Selon l'axe longitudinal ( $z$ ), la trajectoire est constante, à part quand le pied de référence est levé, ce qui diminue l'écart entre le CoM et le pied.

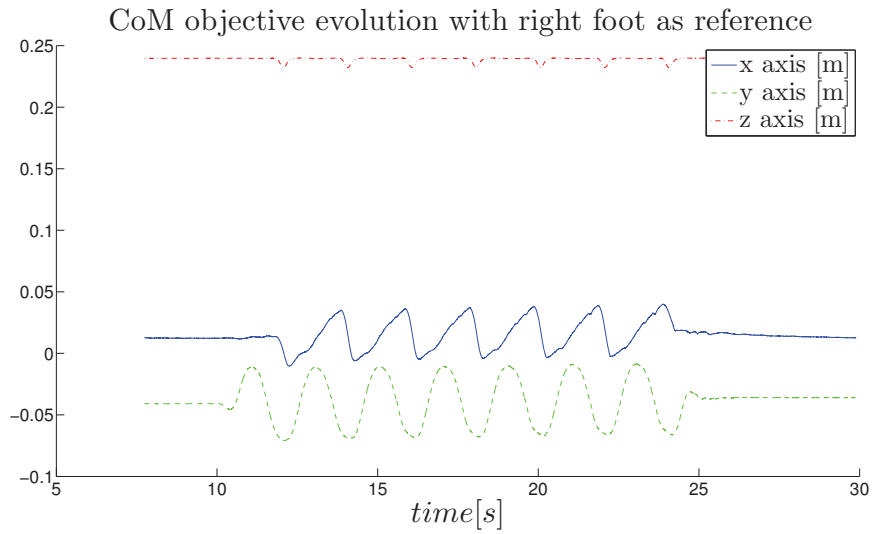


Figure 5.18: Évolution de la position du CoM dans le référentiel du pied droit pour le scénario 3.

L'évolution de la position cartésienne du pied gauche dans le référentiel du pied droit est représentée sur la Figure 5.19. On peut observer que l'écart transversal entre les pied reste constant car la marche est effectuée en ligne droite. L'amplitude des pas (6 cm) est clairement observable selon l'axe antéro-postérieur ( $x$ ).

L'évolution du CoM et du ZMP est tracée, superposée aux empreintes des pieds sur la Figure 5.20. On peut observer que le ZMP est contenu dans le polygone de sustentation. Le mouvement du CoM est le mouvement obtenu par la génération de trajectoire utilisant le 3DLIPM.

Le robot produit une marche stable à l'aide des trajectoires de références et du stabilisateur. Le schéma de contrôle du robot nous permet donc de générer une marche bipède.

Relative feet pose objective position evolution with right foot as reference

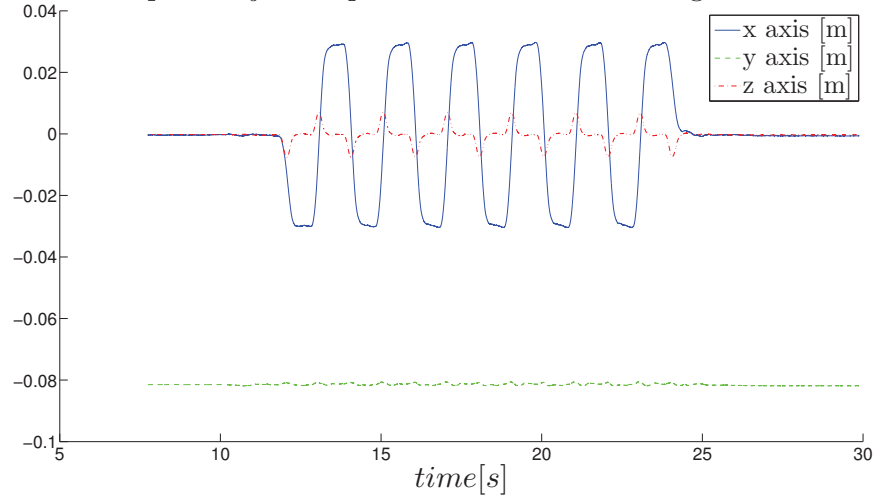


Figure 5.19: Évolution de la position du pied gauche dans le référentiel du pied droit pour le scénario 3.

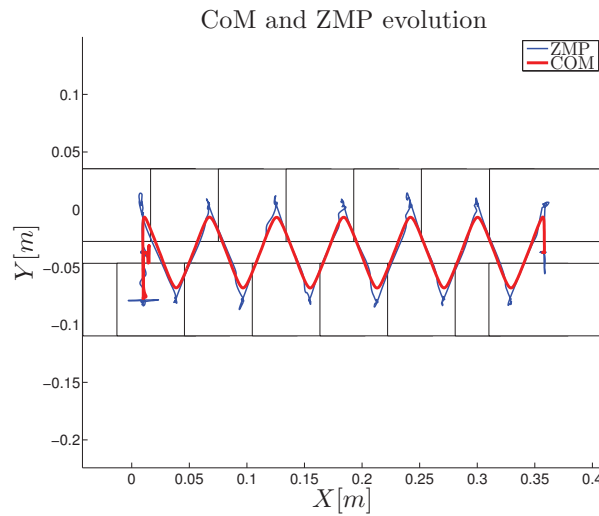


Figure 5.20: Évolution des positions du CoM et du ZMP pour le scénario 3.

### 5.3.4 Scénario 4 : Marche sur un sol irrégulier

Le quatrième scénario est celui d'une marche du robot HOAP-3 sur un sol irrégulier. Ce scénario sert à illustrer la robustesse de l'approche de commande proposée par rapport aux irrégularités du sol non prévues.

#### 5.3.4.1 Objectifs et mise en œuvre

L'expérimentation commence avec le robot HOAP-3 posé sur un sol horizontal plat ; suivi par une pente de 5 degrés comme illustré sur la Figure 5.21. Le robot marche pendant 10 pas. Les trajectoires de référence pour le centre de masse et les pieds sont issues du 3DLIPM. Le 3DLIPM est un modèle proposé par [Kajita *et al.*, 2001b,a] pour simplifier la dynamique du robot en le considérant comme une masse ponctuelle et des jambes de poids négligeable. Ces hypothèses permettent de générer facilement des trajectoires de marche pour le robot. Une implémentation du 3DLIPM a donc été développée pour le robot HOAP-3. La pente est située à 8 cm après son départ. Le robot fait des pas de 6 cm. Le robot rencontre donc la pente à son deuxième pas.

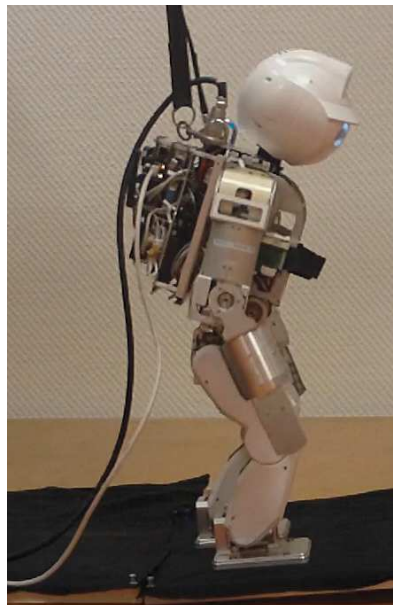


Figure 5.21: Marche sur un sol irrégulier (scénario 4).

#### 5.3.4.2 Résultats

L'évolution des trajectoires articulaires du côté droit du robot HOAP-3 (jambe droite, torse, bras droit et cou) est représentée sur la Figure 5.22. Ce scénario comporte trois phases de durées 11, 14 et 5 secondes respectivement : les trajectoires de 0 à 11 secondes caractérisent la phase d'initialisation du robot. En effet, l'objectif de cette phase consiste à asservir chaque articulation du robot afin d'aller de la position d'initialisation vers la position de confort du robot. De 11 à 25 secondes, le contrôle proposé est actif, les trajectoires demandées pour le CoM et les pieds sont issues du 3DLIPM. La marche désirée est produite grâce à ces trajectoires et au stabilisateur. Les trajectoires de 25 à 30 secondes

caractérisent la phase d'arrêt du robot. Le contrôle proposé est toujours actif, mais les trajectoires demandées pour le CoM et les pieds sont constantes.

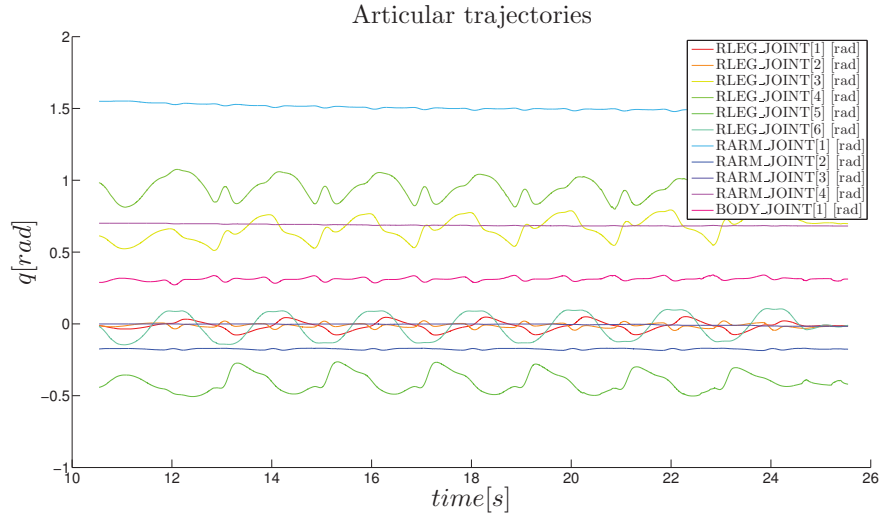


Figure 5.22: Évolution des trajectoires articulaires du côté droit du robot HOAP-3 (jambe droite, torse, bras droit et cou) pour le scénario 4.

Les trajectoires articulaires représentées sur la Figure 5.22 sont semblables à celle de la marche non perturbée représentée sur la Figure 5.22. En effet, l'action du stabilisateur étant dans l'espace opérationnel, les modifications sont réparties sur les ddls.

L'évolution de la position cartésienne du CoM dans le référentiel du pied droit est représentée sur la Figure 5.23. La principale différence par rapport à la marche non perturbée se situe selon l'axe antéro-postérieur ( $x$ ). Le CoM est modifié pendant l'impact puis rapidement ajusté pour permettre l'adaptation à l'inclinaison du sol.

L'évolution de la position cartésienne du pied gauche dans le référentiel du pied droit est représentée sur la Figure 5.24. On peut observer que cette évolution est semblable à celle de la marche non perturbée. En effet, le stabilisateur n'agit pas sur la position des pieds.

L'évolution du CoM et du ZMP est tracée, superposée aux empreintes des pieds sur la Figure 5.25. On peut observer que le ZMP est contenu dans le polygone de sustentation. Le mouvement du CoM est le mouvement obtenu par la génération de trajectoire utilisant le 3DLIPM avec un décalage du CoM vers l'avant du corps quand la perturbation est produite. Ce décalage est produit par le stabilisateur pour stabiliser le mouvement de marche. Le décalage est toujours présent lors de l'arrêt du robot car celui-ci est encore dans la pente.

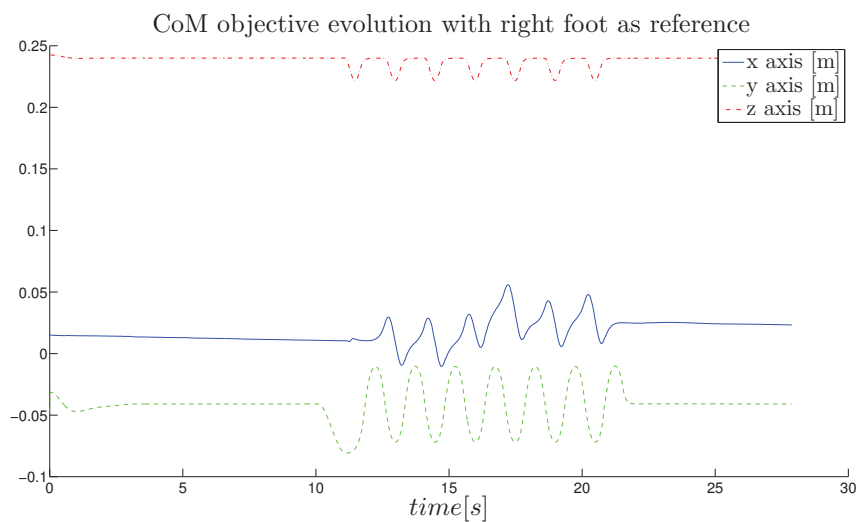


Figure 5.23: Évolution de la position du CoM dans le référentiel du pied droit pour le scénario 4.

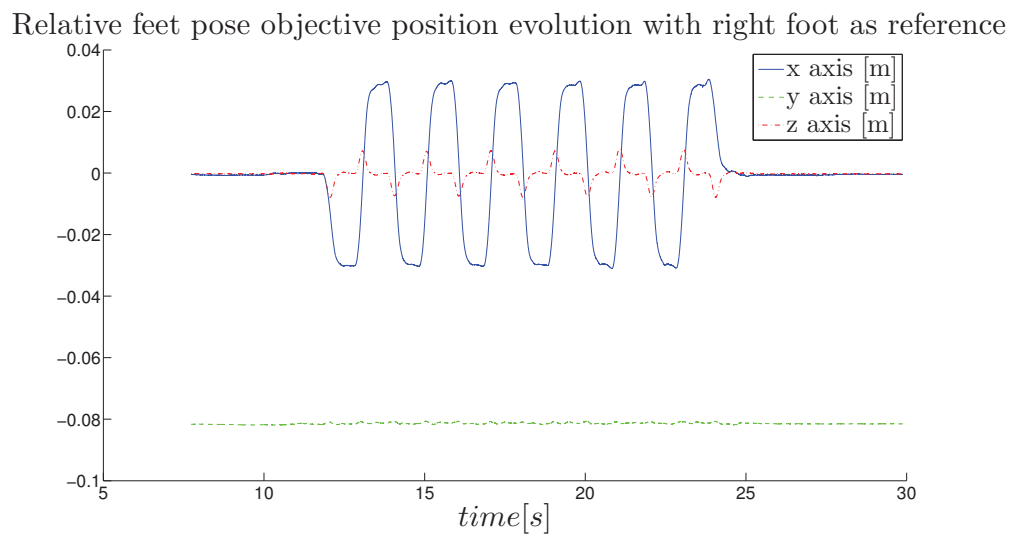


Figure 5.24: Évolution de la position du pied gauche dans le référentiel du pied droit pour le scénario 4.

La pente non prévue est considérée comme une perturbation du contrôle. Le CoM est alors déplacé par le schéma de contrôle afin de maintenir la stabilité. Le cycle de la pose relative des pieds n'est pas perturbé. Le robot garde des trajectoires de marche dynamiques

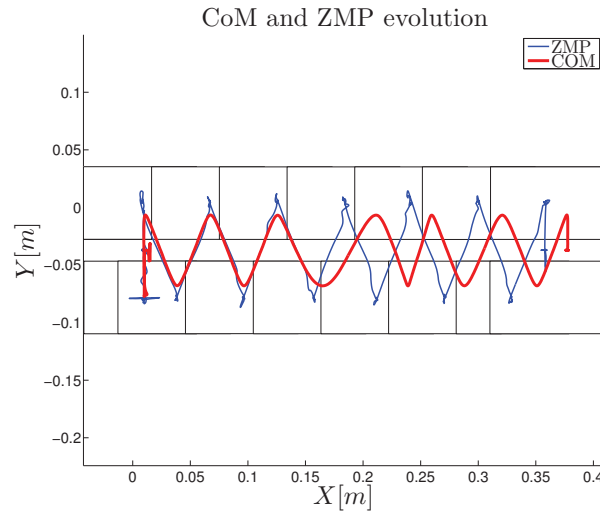


Figure 5.25: Évolution des positions du CoM et du ZMP pour le scénario 4.

stables malgré cette perturbation. Le schéma de contrôle du robot est donc robuste face à cette perturbation.

### 5.3.5 Scénario 5 : Marche avec balancement des bras

Le cinquième scénario est celui d'une marche du robot HOAP-3 sur un sol plat avec balancement des bras. Pour ce scénario, une nouvelle tâche a été rajoutée pour contrôler le mouvement des bras. Ce scénario a été réalisé pour vérifier l'importance du balancement des bras lors de la marche.

#### 5.3.5.1 Objectifs et mise en œuvre

L'expérimentation commence avec le robot HOAP-3 posé sur un sol horizontal plat, sans obstacle, comme illustré sur la Figure 5.21. Le robot marche pendant 10 pas. Les trajectoires de référence pour le centre de masse et les pieds sont issues du 3DLIPM. Les trajectoires de référence pour les bras sont issues d'une transformation des trajectoires de pieds. La position de chaque main est modifiée pour mimer l'avancement du pied opposé. le résultat de cette modification est un balancement des bras du robot. Le robot fait des pas de 6 cm.

#### 5.3.5.2 Résultats

L'évolution des trajectoires articulaires du côté droit du robot HOAP-3 (jambe droite, torse, bras droit et cou) est représentée sur la Figure 5.27.



Figure 5.26: Marche du robot HOAP-3 sur sol horizontal avec balancement des bras pour le scénario 5.

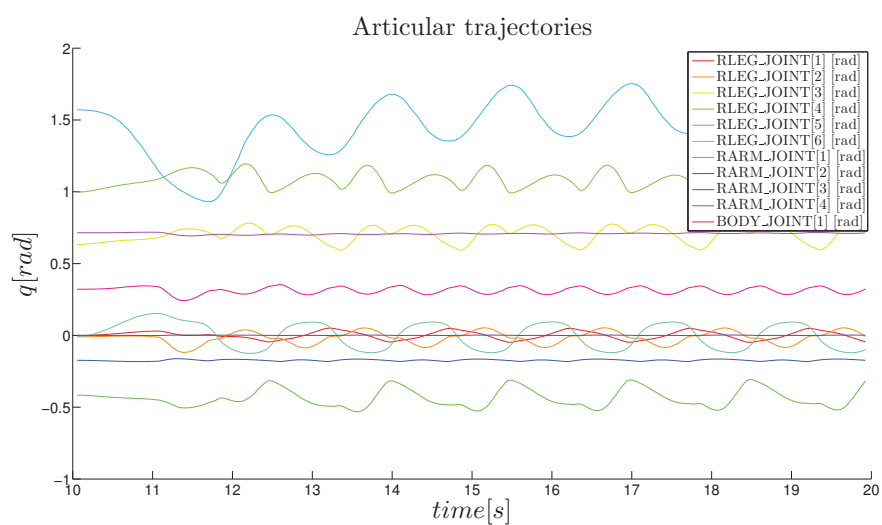


Figure 5.27: Évolution des trajectoires articulaires du côté droit du robot HOAP-3 (jambe droite, torse, bras droit et cou) pour le scénario 5.

Ce scénario comporte trois phases de durées 11, 14 et 5 secondes respectivement : les trajectoires de 0 à 11 secondes caractérisent la phase d'initialisation du robot. En effet, l'objectif de cette phase consiste à asservir chaque articulation du robot afin d'aller de

la position d'initialisation vers la position de confort du robot. De 11 à 25 secondes, le contrôle proposé est actif, les trajectoires demandées pour le CoM et les pieds sont issues du 3DLIPM. La marche désirée est produite grâce à ces trajectoires et au stabilisateur. Les trajectoires de 25 à 30 secondes caractérisent la phase d'arrêt du robot. Le contrôle proposé est toujours actif, mais les trajectoires demandées pour le CoM et les pieds sont constantes.

Le mouvement généré sollicite une majorité des ddls pour produire la marche du robot comme le montre la Figure 5.27. Il est également observable que le mouvement généré tend rapidement vers un mouvement périodique. Le mouvement du bras est aussi observable.

L'évolution de la position cartésienne du CoM dans le référentiel du pied droit est représentée sur la Figure 5.28. Cette trajectoire est semblable à celle de la marche sans la tâche provoquant le balancement des bras.

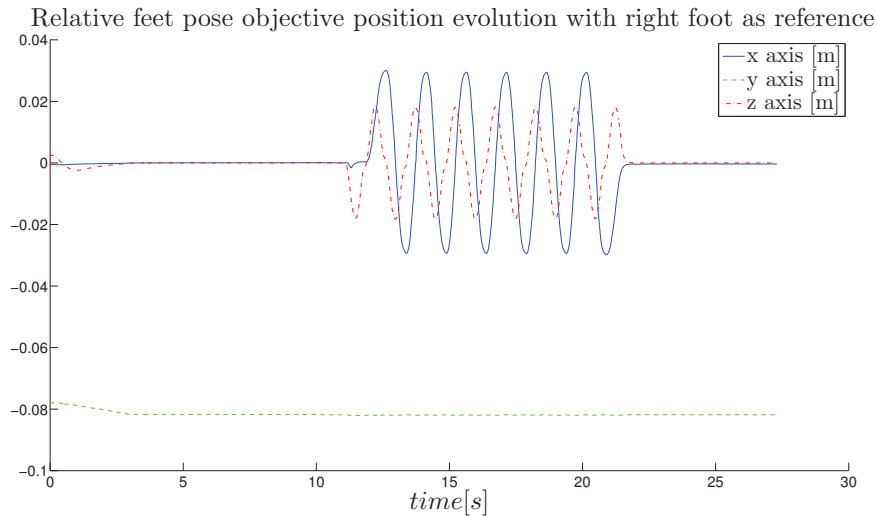


Figure 5.28: Évolution de la position du CoM dans le référentiel du pied droit pour le scénario 5.

L'évolution de la position cartésienne du pied gauche dans le référentiel du pied droit est représentée sur la Figure 5.29. Le cycle du mouvement des pieds n'est pas perturbé par cette tâche.

L'évolution du CoM et du ZMP est tracée, superposée aux empreintes des pieds sur la Figure 5.30. La différence avec le mouvement de marche sans balancement des bras est minime. Celle-ci est plus visible sur la trajectoire du ZMP mais ne modifie que très légèrement la stabilité.



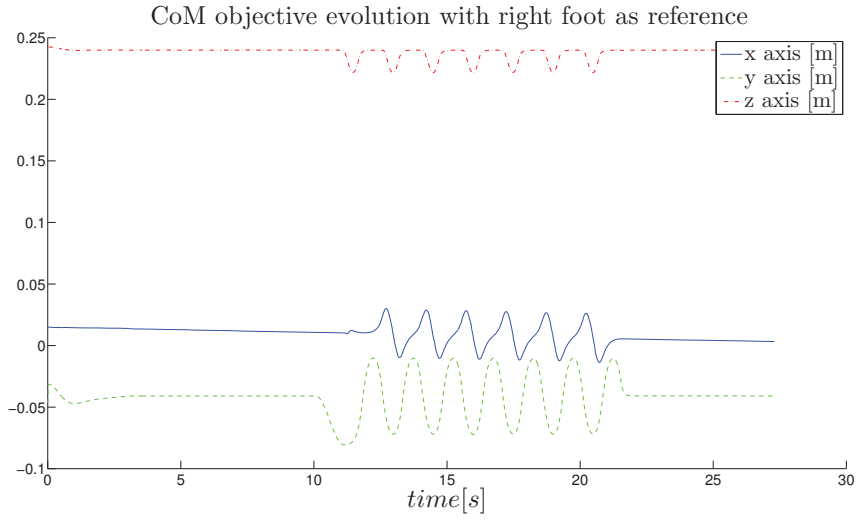


Figure 5.29: Évolution de la position du pied gauche dans le référentiel du pied droit pour le scénario 5.

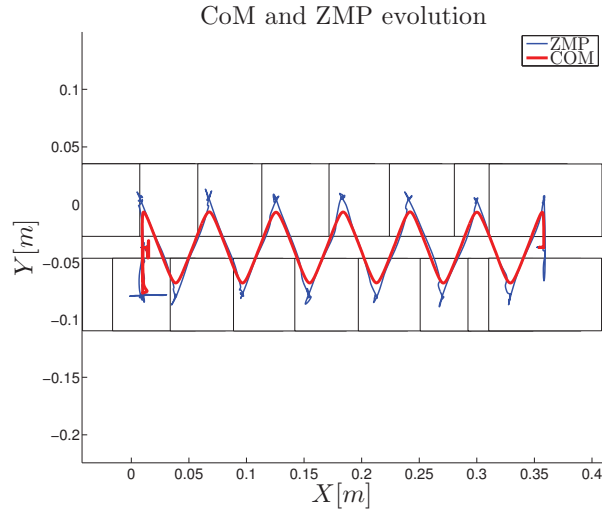


Figure 5.30: Évolution des positions du CoM et du ZMP pour le scénario 5.

L'ajout de la tâche de balancement des bras permet un mouvement plus semblable à l'humain pour l'aspect visuel. Il est cependant difficile de conclure sur l'apport de ce mouvement par rapport à la consommation énergétique du robot. En effet, aucune amélioration n'a été constatée sur la trajectoire du ZMP. Cela est possiblement dû au fait que le mouvement de bras est forcé. Il faudrait, pour améliorer cela, s'intéresser aux mécanismes

à l'origine du balancement des bras chez les êtres humains. Ce scénario permet de se rapprocher du mouvement humain en produisant un mouvement corps-complet.

## 5.4 Conclusion

Ce chapitre a été consacré aux expérimentations sur les prototypes de nos robots.

Nous avons présenté en premier lieu nos deux plate-formes expérimentales, à savoir :

- Le robot bipède Sherpa ;
- Le robot humanoïde HOAP-3.

Pour chacune des plate-formes, nous avons détaillé leur structure cinématique (articulations), matérielle (actionneurs, capteurs) et l'architecture logicielle propre à chacun de ces démonstrateurs.

Par la suite, l'architecture de commande hybride cinématique/dynamique proposée dans le chapitre 3 a été implémentée sur les deux démonstrateurs pour réaliser cinq scénarios d'expérimentation en temps-réel.

Ces scénarios sont :

- Scénario 1 : génération de mouvement de squat cyclique ;
- Scénario 2 : adaptation de la posture à l'inclinaison du sol ;
- Scénario 3 : marche sur un sol horizontal ;
- Scénario 4 : marche sur un sol irrégulier ;
- Scénario 5 : marche corps-complet.

Les résultats des cinq scénarios typiques d'utilisation montrent des possibilités de l'architecture de commande proposée pour permettre la réalisation de scénarios complexes en milieu réel.

Le chapitre suivant est la conclusion de ce manuscrit où l'on présentera aussi les perspectives ouvertes par ces travaux.





---

# Conclusion et perspectives

## Conclusion

Les travaux présentés dans ce manuscrit de thèse ont pour but de proposer une commande corps-complet bio-inspirée pour les robots humanoïdes appliquée à la marche. La commande corps-complet est une des problématiques actuelle de la robotique humanoïde qui permet au robot d'accomplir des tâches utiles. En effet, les études ne portant que sur la locomotion, ou sur la manipulation d'objets avec les membres supérieurs, montrent rapidement leurs limites quand les deux sont combinées pour produire un mouvement correspondant à une tâche utile. Dès lors, il apparaît important de penser le mouvement sur l'ensemble du corps, sans séparer la partie locomotrice de la partie manipulation.

Le mouvement humain a évolué pendant des millions d'années pour aboutir au déplacement optimal que l'on peut observer. Il apparaît donc pertinent de s'intéresser à la marche humaine pour faire contrôler la marche d'un robot humanoïde. Le deuxième chapitre s'est intéressé à l'étude de la marche humaine. La notion de données minimales pour la reproduction de la marche humaine sur un robot humanoïde a été développée. La contribution principale a été de reproduire le cycle de marche au niveau des pieds et la trajectoire du centre de masse. Ces deux objectifs sont la base de la marche humaine et humanoïde.

Pour le suivi de ces trajectoires, le principe de tâches hiérarchiques a été utilisé afin de permettre un mouvement corps-complet respectant plusieurs objectifs cinématique dans l'espace opérationnel. La loi de commande liée au principe de tâches hiérarchiques est présentée au début du troisième chapitre. Le mouvement de marche est reproductible grâce aux deux objectifs cinématiques sur une structure robotique anthropomorphe ; mais

le suivi de la trajectoire des données minimales ne garantit pas la stabilité dynamique de la marche lors de l'application sur un robot humanoïde.

Pour assurer une stabilité dynamique, il est nécessaire d'utiliser les critères de stabilité mesurés par le robot pour adapter sa posture. Pour cela, nous avons proposé d'utiliser le critère de stabilité dynamique Zero Moment Point (ZMP). L'erreur liée au ZMP a été régulée par un contrôleur proportionnelle intégrale dérivée (PID) non linéaire. Cette régulation du ZMP a été projetée dans l'espace de contrôle du Centre de masse (CoM) à l'aide d'une projection sphérique afin de permettre une adaptation réactive de la posture du robot. L'orientation du buste a été modifiée au travers d'un objectif supplémentaire afin d'éviter les auto-collisions au niveau des jambes du robot.

Pour réussir la transposition du mouvement de marche sur le robot, il a été nécessaire de prendre en compte ses limites articulaires. Ceci a été réalisé en ajoutant un dernier objectif qui fait converger la pose du robot vers une position de confort, la plus éloignée possible des limites articulaires tout en respectant les objectifs précédents.

Cette commande corps-complet utilise donc le principe de tâches pour quatre objectifs cinématique :

1. la pose relative des pieds ;
2. la position du CoM ;
3. l'orientation du buste ;
4. l'éloignement des butées articulaires.

La stabilité a été renforcée en modifiant la position du CoM désiré à l'aide d'une régulation non linéaire du ZMP. La loi de commande proposée a été désignée par : "architecture de commande hybride cinématique/dynamique".

Le quatrième chapitre est dédié à la modélisation et aux simulations réalisées durant cette thèse. En effet, pour tester les lois de commande proposées sans abîmer les robots, il a été nécessaire de créer un simulateur dynamique de robot multi-corps rigides à base flottante permettant la prise en compte de multiples points de contact. Plusieurs scénarios de simulations sont présentés dans le quatrième chapitre afin de tester les lois de commande proposées.

Le cinquième chapitre présente les deux démonstrateurs :

- Le robot bipède Sherpa ;
- Le robot humanoïde HOAP-3.

Ces deux robots ont été utilisés pour tester l'architecture de commande hybride cinématique/dynamique au travers de plusieurs scénarios d'expérimentation temps-réel afin de montrer la généricité de cette commande.

Ces deux derniers chapitres ont permis de démontrer l'utilité de cette architecture de commande au travers de multiples scénarios et sa capacité à être utile lors d'une utilisation en milieu réel.

## Perspectives

L'architecture de commande hybride cinématique/dynamique permet de générer des mouvements pour les scénarios présentés. Le formalisme de tâches a été favorisé afin de rendre cette loi de contrôle modulaire, pour pouvoir s'adapter à de nouvelles contraintes.

Les perspectives de recherche sont multiples et peuvent être différenciées en trois axes principaux :

- l'analyse de la marche ;
- la validation formelle de l'approche ;
- l'automatisation de la génération.

En effet, l'architecture de commande hybride cinématique/dynamique peut être étendue pour former une commande corps-complet plus fiable encore.

Pour l'analyse de la marche, il serait utile d'arriver à trouver la raison de l'échec à identifier une fonction de coût énergétique en fonction de la vitesse de marche et des amplitude de déplacement du CoM. La fonction de coût pourrait être modifiée pour essayer de mieux comprendre quels paramètres de la marche sont optimisés naturellement par l'être humain.

Il serait également intéressant de trouver les mécanismes à l'origine du balancement des bras chez les êtres humains. Des simulations pourraient être conduites en ajoutant un objectif de régulation du moment cinétique du robot afin de minimiser le moment vertical au niveau du pied d'appui. La compensation de cette rotation pourrait être produite par un mouvement de balancement des bras semblable à celui d'une marche humaine.

L'approche pourrait aussi être le sujet d'une analyse de stabilité afin de démontrer analytiquement l'apport de cette loi de commande. L'analyse de la stabilité peut être simplifiée en utilisant un modèle de pendule inversé afin de réduire la dimension du problème, mais la généralisation au corps-complet avec les boucles cinématique serait difficile à réaliser.

Enfin, une perspective possible serait d'arriver à déterminer analytiquement les gains à utiliser pour le réglage du stabilisateur non linéaire. En effet, les gains actuels ont été déterminés de manière empirique. L'architecture de commande hybride cinématique/dynamique serait plus attractive encore avec des gains facilement calculables évitant ainsi une phase de réglage qui peut s'avérer longue sur un système aussi complexe qu'un robot humanoïde.



ANNEXE

**A**

---

## **Placement des marqueurs Plug-in-gait**



La Figure A.1 indique le placement sur le corps humain des marqueurs pour le gabarit Plug-in-gait.

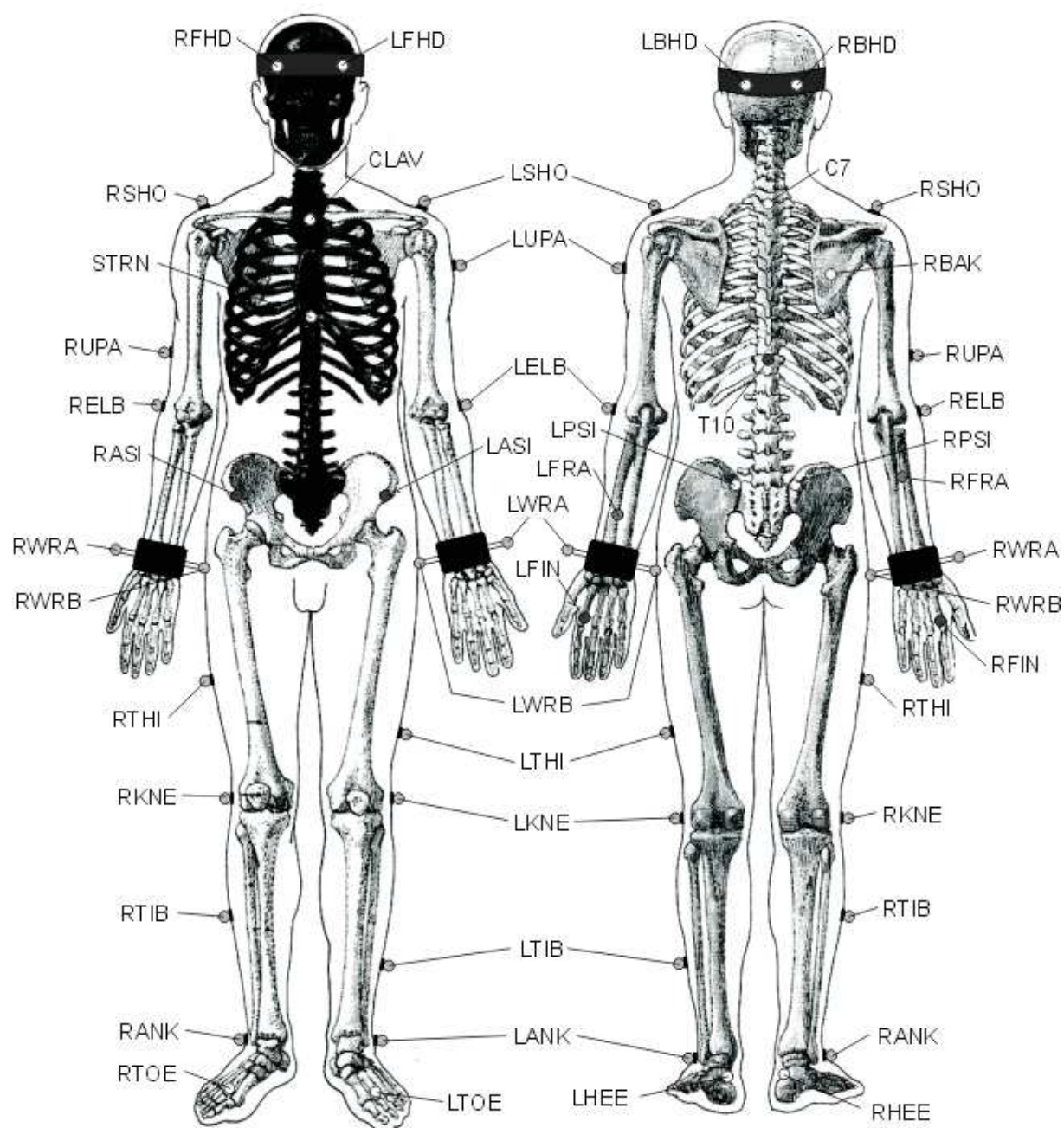


Figure A.1: Placement des 35 marqueurs réflectifs du gabarit corps-complet Plug-in-gait.

La liste des marqueurs et leur signification est indiquée dans la table A.1.

Tableau A.1: Liste des marqueurs du gabarit corps-complet Plug-in-gait.

Notation	Terminologie	Commentaire
<b>Upper Body</b>		<b>Haut du corps</b>
Head markers		Marqueurs pour la tête
LFHD	Left front head	Placé sur la tempe gauche.
RFHD	Right front head	Placé sur la tempe droite.
LBHD	Left back head	Placé à l'arrière gauche de la tête.
RBHD	Right back head	Placé à l'arrière droite de la tête.
Torso Markers		Marqueurs pour le torse
C7	7 th Cervical Vertebrae	Placé sur la septième vertèbre cervicale.
T10	10 th Thoracic Vertebrae	Placé sur la dixième vertèbre thoracique.
CLAV	Clavicle	Placé sur la fourchette sternale où les clavicules rencontrent le sternum.
STRN	Sternum	Placé sur l'appendice xiphoïde du sternum
RBAK	Right Back	Placé au milieu de l'omoplate droite. Ce marqueur n'a pas de marqueur symétrique sur le côté gauche. Cette asymétrie permet à la procédure d'auto-étiquetage de déterminer la droite de la gauche sur le sujet.
Arm Markers		Marqueurs pour les bras
LSHO	Left shoulder marker	Placé sur l'articulation acromio-claviculaire.
LUPA	Left upper arm marker	Placé sur la partie supérieure du bras entre les marqueurs du coude et de l'épaule. Il doit être placé de façon asymétrique par rapport à RUPA.
LELB	Left elbow	Placé sur l'épicondyle sur l'axe d'articulation du coude.
LFRA	Left forearm marker	Placé sur l'avant-bras entre les marqueurs du poignet et du coude. Il devrait être placé de façon asymétrique par rapport à RFRA.

Liste des marqueurs du gabarit corps-complet Plug-in-gait (*suite*).

Notation	Terminologie	Commentaire
<b>Upper Body</b>		<b>Haut du corps</b>
Arm Markers		Marqueurs pour les bras
LWRA	Left wrist marker A	Barre placée sur le poignet gauche, côté du pouce.
LWRB	Left wrist marker B	Barre placée sur le poignet gauche, côté de l'auriculaire.
LFIN	Left fingers	Placé sur le dos de la main, juste sous la tête du deuxième métacarpien.
<b>Lower Body</b>		<b>Bas du corps</b>
Pelvis		Marqueurs pour le pelvis
LASI	Left ASIS	Placé directement sur la partie antérieure gauche de l'épine iliaque.
RASI	Right ASIS	Placé directement sur la partie antérieure droite de l'épine iliaque.
LPSI	Left PSIS	Placé directement sur la partie postérieure gauche de l'épine iliaque.
RPSI	Right PSIS	Placé directement sur la partie postérieure droite de l'épine iliaque.
Leg Markers		Marqueurs pour les jambes
LKNE	Left knee	Placé sur l'épicondyle latérale du genou gauche.
LTHI	Left thigh	Placé sur la partie latérale inférieure à 1/3 de la hauteur de la cuisse, juste en dessous de la portée de la main.
LANK	Left ankle	Placé sur la malléole latérale le long d'une ligne imaginaire qui passe par l'axe de transmalléolaire.

Liste des marqueurs du gabarit corps-complet Plug-in-gait (*suite*).

Notation	Terminologie	Commentaire
<b>Lower Body</b>		<b>Bas du corps</b>
Leg Markers		Marqueurs pour les jambes
LTIB	Left tibial wand marker	Comme pour les marqueurs de la cuisse, ceux-ci sont placés sur le 1/3 inférieur du tibia afin de déterminer l'alignement de l'axe de flexion de la cheville.
Foot Markers		Marqueurs pour le pied
LTOE	Left toe	Placé sur la deuxième tête métatarsienne, côté médio-pied par rapport à la rupture équin entre l'avant-pied et du médio-pied
LHEE	Left heel	Placé sur le calcanéum à la même hauteur au-dessus de la surface plantaire du pied que le marqueur LTOE.



---

## **Dimensions et débattements articulaires du robot HOAP-3**

La Figure B.1 indique le positionnement des mesures indiquées par la suite dans le tableau B.1.

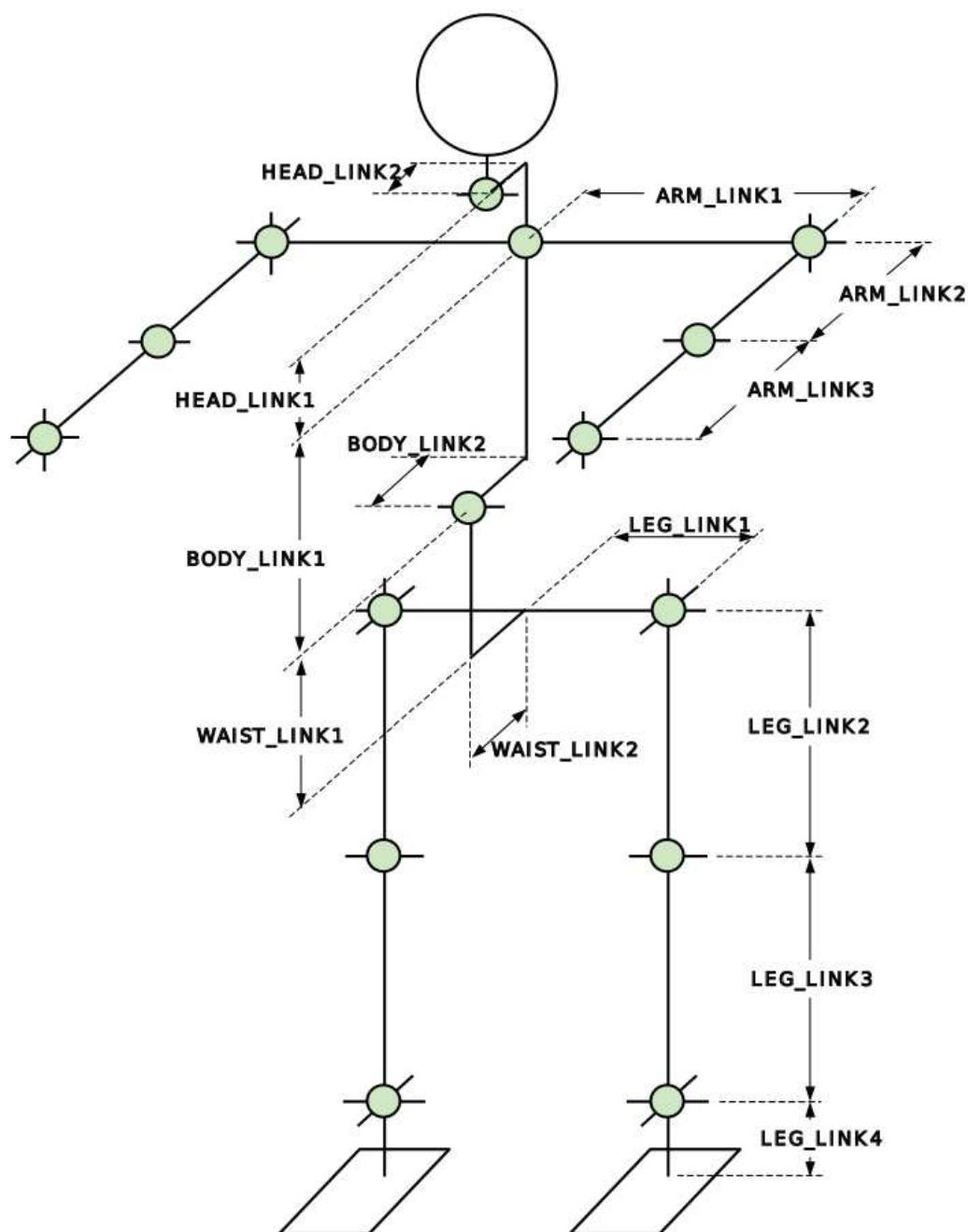


Figure B.1: Dimensions du robot HOAP-3. (Source : HOAP-3 INSTRUCTION MANUAL, Fujitsu Automation Limited)

Tableau B.1: Liste des longueurs des segments du HOAP-3 correspondant à la figure [B.1](#).

Segment	Longueur
ARM_LINK1	0.111 m
ARM_LINK2	0.111 m
ARM_LINK3	0.171 m
LEG_LINK1	0.039 m
LEG_LINK2	0.105 m
LEG_LINK3	0.105 m
LEG_LINK4	0.040 m
BODY_LINK1	0.125 m
BODY_LINK2	0.035 m
HEAD_LINK1	0.103 m
HEAD_LINK2	0.015 m
WAIST_LINK1	0.055 m
WAIST_LINK2	0.035 m



Tableau B.2: Débattements articulaires du HOAP-3.

Nom de l'articulation	axe de rotation	$q_{\min}$ en degrés	$q_{\max}$ en degrés
RLEG_JOINT[1]	Right hip torsion	-91	31
RLEG_JOINT[2]	Right hip roll	-31	21
RLEG_JOINT[3]	Right hip pitch	-82	71
RLEG_JOINT[4]	Right knee	-1	130
RLEG_JOINT[5]	Right ankle pitch	-61	61
RLEG_JOINT[6]	Right ankle roll	-25	25
RARM_JOINT[1]	Right shoulder pitch	-91	151
RARM_JOINT[2]	Right shoulder roll	-96	1
RARM_JOINT[3]	Right shoulder torsion	-91	91
RARM_JOINT[4]	Right elbow	-115	1
LLEG_JOINT[1]	Left hip torsion	-31	91
LLEG_JOINT[2]	Left hip roll	-21	31
LLEG_JOINT[3]	Left hip pitch	-82	71
LLEG_JOINT[4]	Left knee	-1	130
LLEG_JOINT[5]	Left ankle pitch	-61	61
LLEG_JOINT[6]	Left ankle roll	-25	25
LARM_JOINT[1]	Left shoulder pitch	-91	151
LARM_JOINT[2]	Left shoulder roll	-1	96
LARM_JOINT[3]	Left shoulder torsion	-91	91
LARM_JOINT[4]	Left elbow	-115	1
BODY_JOINT[1]	Waist pitch	-1	90
HEAD_JOINT[1]	Head torsion	-60	60
HEAD_JOINT[2]	Head pitch	-45	15
HEAD_JOINT[3]	Head roll	-15	15
RARM_JOINT[5]	Right fingers	-60	60
RARM_JOINT[6]	Right hand torsion	-90	90
LARM_JOINT[5]	Left fingers	-60	60
LARM_JOINT[6]	Left hand torsion	-90	90



---

## Bibliographie

- Hitoshi Arisumi, Sylvain Miossec, J-R Chardonnet et Kazuhito Yokoi : Dynamic lifting by whole body motion of humanoid robots. *In IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'2008)*, pages 668–675. IEEE, 2008. Cité page [25](#).
- Christine Azevedo : *Contrôle de la locomotion artificielle : de l'homme aux robots*. PhD thesis, INRIA, INPG, 2003. Cité page [14](#).
- Paolo Baerlocher et Ronan Boulic : Task-priority formulations for the kinematic control of highly redundant articulated structures. *In IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'1998)*, volume 1, pages 323–329. IEEE, 1998. Cité page [58](#).
- Adi Ben-Israel et Thomas NE Greville : *Generalized inverses*, volume 15. Springer, 2003. Cité page [56](#).
- Vincent Bonnet, Claudia Mazzà, Philippe Fraisse et Aurelio Cappozzo : A least-squares identification algorithm for estimating squat exercise mechanics using a single inertial measurement unit. *Journal of Biomechanics*, 45(8):1472 – 1477, 2012. Cité page [87](#).
- Thomas Buschmann, Sebastian Lohmeier et Heinz Ulbrich : Humanoid robot Lola : Design and walking control. *Journal of Physiology-Paris*, 103(3):141–148, 2009. Cité page [63](#).
- Christine Chevallereau et Yannick Aoustin : Optimal reference trajectories for walking and running of a biped robot. *Robotica*, 19(05):557–569, 2001. Cité page [24](#).
- Baek-Kyu Cho, Jung-Hoon Kim et Jun-Ho Oh : Online balance controllers for a hopping and running humanoid robot. *Advanced Robotics*, 25(9-10):1209–1225, 2011. Cité page [63](#).

- Youngjin Choi, Doik Kim et Bum-Jae You : On the walking control for humanoid robot based on the kinematic resolution of com jacobian with embedded motion. *In IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'2006)*, pages 2655–2660. IEEE, 2006. Cité page [63](#).
- Youngjin Choi, Bum-Jae You et Sang-Rok Oh : On the stability of indirect zmp controller for biped robot systems. *In IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'2004)*, volume 2, pages 1966–1971. IEEE, 2004. Cité page [63](#).
- Sebastien Cotton, Philippe Fraisse et Andrew P. Murray : On the manipulability of the center of mass of humanoid robots : Application to design. *ASME Conference Proceedings*, 2 (44106):1259–1267, 2010. Cité page [45](#).
- Sébastien Dalibard, A El Khouly, Florent Lamiroux, Michel Taix et J-P Laumond : Small-space controllability of a walking humanoid robot. *In 11th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids'2011)*, pages 739–744. IEEE, 2011. Cité page [26](#).
- Paolo De Leva : Adjustments to zatsiorsky-seluyanov's segment inertia parameters. *Journal of Biomechanics*, 29(9):1223–1230, 1996. Cité page [38](#).
- Joris De Schutter, Tinne De Laet, Johan Rutgeerts, Wilm Decré, Ruben Smits, Erwin Aertbeliën, Kasper Claes et Herman Bruyninckx : Constraint-based task specification and estimation for sensor-based robot systems in the presence of geometric uncertainty. *The International Journal of Robotics Research*, 26(5):433–455, 2007. Cité page [26](#).
- Ugo Della Croce et Aurelio Cappozzo : A spot check for estimating stereophotogrammetric errors. *Medical and Biological Engineering and Computing*, 38(3):260–266, 2000. Cité page [35](#).
- J Maxwell Donelan, Rodger Kram et Arthur D Kuo : Mechanical work for step-to-step transitions is a major determinant of the metabolic cost of human walking. *Journal of Experimental Biology*, 205(23):3717–3727, 2002. Cité page [15](#).
- Adrien Escande, Nicolas Mansard et Pierre-Brice Wieber : Hierarchical quadratic programming : Fast online humanoid-robot motion generation. *The International Journal of Robotics Research*, page 0278364914521306, 2014. Cité page [26](#).
- Shuai Feng et Zengqi Sun : A simple trajectory generation method for biped walking. *In Proceedings of the 10th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV'08)*, pages 2078–2082, Hanoi, Vietnam, 2008. Cité page [62](#).
- Andrew C Fry, J Chadwick Smith et Brian K Schilling : Effect of knee position on hip and knee torques during the barbell squat. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 17(4):629–633, 2003. Cité page [87](#).

- Mark Galassi, Jim Davies, James Theiler, Brian Gough, Gerard Jungman, Michael Booth et Fabrice Rossi : *GNU Scientific Library Reference Manual - Third Edition*. Network Theory Ltd., 3rd édition, 2009. ISBN 0954612078, 9780954612078. URL <http://www.gnu.org/software/gsl/>. Cité page 86.
- Ambarish Goswami : Postural stability of biped robots and the foot-rotation indicator (FRI) point. *The International Journal of Robotics Research*, 18(6):523–533, 1999. Cité page 18.
- Elena M Gutierrez-Farewik, Asa Bartonek et Helena Saraste : Comparison and evaluation of two common methods to measure center of mass displacement in three dimensions during gait. *Human Movement Science*, 25(2):238–256, 2006. Cité page 36.
- Kensuke Harada, Kanako Miura, Mitsuharu Morisawa, Kenji Kaneko, Shinichiro Nakaoka, Fumio Kanehiro, Tokuo Tsuji et Shuuji Kajita : Toward human-like walking pattern generator. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'2009)*, pages 1071–1077. IEEE, 2009. Cité page 26.
- Rodolphe Heliot et Roger Pissard-Gibollet : Analyse de la marche humaine par ondelettes. *Stage INRIA*, 2005. Cité page 13.
- Kazuo Hirai, Masato Hirose, Yuji Haikawa et Toru Takenaka : The development of honda humanoid robot. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'1998)*, volume 2, pages 1321–1326. IEEE, 1998. Cité page 63.
- Qiang Huang et Yoshihiko Nakamura : Sensory reflex control for humanoid walking. *IEEE Transactions on Robotics*, 21(5):977–984, 2005. Cité page 63.
- Auke Jan Ijspeert : Central pattern generators for locomotion control in animals and robots : a review. *Neural Networks*, 21(4):642–653, 2008. Cité page 25.
- S. Kajita, H. Hirukawa, K. Harada et K. Yokoi : *Introduction à la commande des robots humanoïdes*. Translated in French by Sakka, S. Springer, 2009. Cité pages 18, 23, 80 et 82.
- Shuuji Kajita, Fumio Kanehiro, Kenji Kaneko, Kiyoshi Fujiwara, Kazuhito Yokoi et Hirohisa Hirukawa : Biped walking pattern generation by a simple three-dimensional inverted pendulum model. *Advanced Robotics*, 17(2):131–147, 2003. Cité page 63.
- Shuuji Kajita, Fumio Kanehiro, Kenji Kaneko, Kazuhito Yokoi et Hirohisa Hirukawa : The 3D Linear Inverted Pendulum Mode : A simple modeling for a biped walking pattern generation. In *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'01)*, pages 239–246, Maui, Hawaii, USA, 2001a. Cité pages 62 et 118.
- Shuuji Kajita, Osamu Matsumoto et Muneharu Saigo : Real-time 3D walking pattern generation for a biped robot with telescopic legs. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'2001)*, volume 3, pages 2299–2306. IEEE, 2001b. Cité pages 62 et 118.

- Oussama Khatib, Luis Sentis, Jaeheung Park et James Warren : Whole-body dynamic behavior and control of human-like robots. *International Journal of Humanoid Robotics*, 1 (01):29–43, 2004. Cité page 26.
- Seungsu Kim, ChangHwan Kim, Bumjae You et Sangrok Oh : Stable whole-body motion generation for humanoid robots to imitate human motions. In *Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'09)*, pages 2518–2524, 2009. Cité page 25.
- Yong-Duk Kim, Bum-Joo Lee, Jeong-Ki Yoo, Jong-Hwan Kim et Jee-Hwan Ryu : Compensation for the landing impact force of a humanoid robot by time domain passivity approach. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'2006)*, pages 1225–1230. IEEE, 2006. Cité page 63.
- Musée Kostas Kotsanas : Musée des technologies des grecs de l'antiquité, 2014. URL <http://kotsanas.com/fr/exh.php?exhibit=0401001>. Cité page 8.
- Arthur D Kuo : The six determinants of gait and the inverted pendulum analogy : A dynamic walking perspective. *Human movement science*, 26(4):617–656, 2007. Cité page 15.
- Bum-Joo Lee, Daniel Stonier, Yong-Duk Kim, Jeong-Ki Yoo et Jong-Hwan Kim : Modifiable walking pattern of a humanoid robot by using allowable zmp variation. *IEEE Transactions on Robotics*, 24(4):917–925, 2008. Cité page 63.
- Sung-Hee Lee et Ambarish Goswami : Ground reaction force control at each foot : A momentum-based humanoid balance controller for non-level and non-stationary ground. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'2010)*, pages 3157–3162. IEEE, 2010. Cité page 63.
- Sébastien Lengagne, Nacim Ramdani et Philippe Fraise : Guaranteed computation of constraints for safe path planning. In *Proceedings of IEEE International Conference on Humanoid Robots (Humanoids'2007)*, pages 312–317, 2007. Cité page 24.
- Sébastien Lengagne, Nacim Ramdani et Philippe Fraise : Planning and fast replanning safe motions for humanoid robots. *IEEE Transactions on Robotics*, 27(6):1095–1106, 2011. Cité page 25.
- Sébastien Lengagne, Joris Vaillant, Eiichi Yoshida et Abderrahmane Kheddar : Generation of whole-body optimal dynamic multi-contact motions. *International Journal of Robotics Research*, 32(9-10):1104–1119, 2013. Cité page 27.
- Z Li, S Shankar Sastry et RM Murray : A mathematical introduction to robotic manipulation, 1994. Cité pages 22 et 23.

- Alain Liegeois : Automatic supervisory control of the configuration and behavior of multi-body mechanisms. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 7(12):868–871, 1977. Cité pages 26 et 61.
- Shugen Ma, Takashi Tomiyama et Hideyuki Wada : Omnidirectional static walking of a quadruped robot. *IEEE Transactions on Robotics*, 21(2):152–161, 2005. Cité page 17.
- Anthony A Maciejewski et Charles A Klein : Obstacle avoidance for kinematically redundant manipulators in dynamically varying environments. *The international journal of robotics research*, 4(3):109–117, 1985. Cité page 58.
- R Mahony, Tarek Hamel, Jochen Trumpf et Christian Lageman : Nonlinear attitude observers on  $so(3)$  for complementary and compatible measurements : A theoretical study. *In 48th IEEE Conference on Decision and Control (CDC/CCC'2009)*, pages 6407–6412. IEEE, 2009. Cité page 22.
- Nicolas Mansard, Olivier Stasse, Paul Evrard et Abderrahmane Kheddar : A versatile generalized inverted kinematics implementation for collaborative working humanoid robots : The stack of tasks. *In Proceedings of IEEE International Conference on Advanced Robotics (ICAR'2009)*, pages 1–6, 2009. Cité page 26.
- Firas Massaad, Thierry M Lejeune et Christine Detrembleur : The up and down bobbing of human walking : a compromise between muscle work and efficiency. *The Journal of physiology*, 582(2):789–799, 2007. Cité page 41.
- Youcef Mezouar et François Chaumette : Path planning for robust image-based control. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 18(4):534–549, 2002. Cité page 60.
- Vishwanathan Mohan, Pietro Morasso, Giorgio Metta et Giulio Sandini : A biomimetic, force-field based computational model for motion planning and bimanual coordination in humanoid robots. *Autonomous robots*, 27(3):291–307, 2009. Cité page 60.
- Katja Mombaur, Anh Truong et Jean-Paul Laumond : From human to humanoid locomotion - an inverse optimal control approach. *Autonomous robots*, 28(3):369–383, 2010. Cité pages 15 et 27.
- Francisco-Javier Montecillo-Puente, Manish N. Sreenivasa et Jean-Paul Laumond : On real-time whole-body human to humanoid motion transfer. *In Proceedings of International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO'10)*, pages 22–31, 2010. Cité pages 27 et 45.
- Eliakim Hastings Moore : On the reciprocal of the general algebraic matrix. *In Bulletin of the American Mathematical Society*, volume 26, pages 394–5, 1920. Cité pages 46 et 56.



- Yoshihiko Nakamura, Hideo Hanafusa et Tsuneo Yoshikawa : Task-priority based redundancy control of robot manipulators. *The International Journal of Robotics Research*, 6 (2):3–15, 1987. Cité pages 26, 46, 56 et 57.
- José Victor Nuñez Nalda : Etude de la commande des mouvements dynamiques d'un robot humanoïde. 2008. Cité pages ix, 18 et 19.
- Ionut Mihai Constantin Olaru, Sébastien Krut et François Pierrot : Novel mechanical design of biped robot sherpa using 2 dof cable differential modular joints. *In Proceedings of the 2009 IEEE/RSJ International conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'09)*, pages 4463–4468, St. Louis, MO, USA, 2009. Cité pages 100 et 101.
- Rick Parent : ANIMATIQUE : Algorithmes et techniques. *Vuibert Paris*, 2003. Cité pages ix et 14.
- Jacques Péliissier et Dominique Boisson : Les paramètres de la marche humaine. techniques actuelles d'exploration. *La marche humaine et sa pathologie. Paris : Masson*, pages 41–55, 1994. Cité page 37.
- Roger Penrose : A generalized inverse for matrices. *In Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, volume 51, pages 406–413. Cambridge Univ Press, 1955. Cité pages 46 et 56.
- Philon de Byzance et Baron Carra de Vaux : *Le Livre des appareils pneumatiques et des machines hydrauliques, par Philon de Byzance, édité d'après les versions arabes d'Oxford et de Constantinople, et traduit en français par le Baron Carra de Vaux,...* C. Klincksieck, 1902. Cité page 8.
- Nancy S Pollard, Jessica K Hodgins, Marcia J Riley et Christopher G Atkeson : Adapting human motion for the control of a humanoid robot. *In Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'2002)*., volume 2, pages 1390–1397, 2002. Cité page 25.
- Oscar E. Ramos, Layale Saab, Sovannara Hak et Nicolas Mansard : Dynamic motion capture and edition using a stack of tasks. *In IEEE International Conference on Humanoid Robots (Humanoids'2011)*, pages 224–230, 2011. Cité page 26.
- Carlos Rengifo, Yannick Aoustin, Christine Chevallereau et Franck Plestan : A penalty-based approach for contact forces computation in bipedal robots. *In 9th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids'2009)*., pages 121–127. IEEE, 2009. Cité page 83.
- C.F. Rengifo Rodas : *Contributions à la commande d'un robot bipède 3D*. PhD thesis, IRC-CYN, Université de Nantes, 2010. Cité page 84.

- Matthias Rolf, Jochen J Steil et Michael Gienger : Efficient exploration and learning of whole body kinematics. In *IEEE 8th International Conference on Development and Learning (ICDL'2009)*, pages 1–7. IEEE, 2009. Cité page 25.
- Jessica Rose, James Gibson Gamble et Janet M Adams : *Human walking*. Lippincott Williams & Wilkins Philadelphia, 2006. Cité page 12.
- L. Roussel : *Génération de trajectoires optimales de marche pour un robot bipède*. PhD thesis, LAG, INPG, 1998. Cité page 14.
- Diego Ruspini et Oussama Khatib : Collision/contact models for the dynamic simulation of complex environments. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'1997)*, volume 97. Citeseer, 1997. Cité page 84.
- Joseph Salini, Sébastien Barthélemy et Philippe Bidaud : Lqp controller design for generic whole body motion. *Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines*, 2009. Cité page 24.
- Philippe Sardain et Guy Bessonnet : Forces acting on a biped robot. Center of pressure-zero moment point. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A : Systems and Humans*, 34(5):630–637, 2004. Cité page 18.
- Lorenzo Sciavicco et Bruno Siciliano : *Modelling and control of robot manipulators*. Springer, 2000. Cité page 83.
- Luis Sentis et Oussama Khatib : A whole-body control framework for humanoids operating in human environments. In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'2006)*, pages 2641–2648, 2006. Cité page 26.
- Luis Sentis, Jaeheung Park et Oussama Khatib : Compliant control of multicontact and center-of-mass behaviors in humanoid robots. *IEEE Transactions on Robotics*, 26(3):483–501, 2010. Cité page 45.
- Homayoun Seraji : A new class of nonlinear pid controllers with robotic applications. *Journal of Robotic Systems*, 15(3):161–181, 1998. Cité page 66.
- Weiwei Shang et Shuang Cong : Nonlinear computed torque control for a high-speed planar parallel manipulator. *Mechatronics*, 19(6):987–992, 2009. Cité page 66.
- Bruno Siciliano et J-JE Slotine : A general framework for managing multiple tasks in highly redundant robotic systems. In *Fifth International Conference on Advanced Robotics, 'Robots in Unstructured Environments' (ICAR'1991)*, pages 1211–1216. IEEE, 1991. Cité pages 26, 46, 56, 58 et 73.
- SGI Silicon Graphics : Opengl library, 2006. URL <http://www.opengl.org/>. Cité page 86.



- Ruben Smits, Tinne De Laet, Kasper Claes, Herman Bruyninckx et Joris De Schutter : itasc : A tool for multi-sensor integration in robot manipulation. In *Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*, pages 235–254. Springer, 2009. Cité page 26.
- Mark W Spong, Seth Hutchinson et Mathukumalli Vidyasagar : *Robot modeling and control*, volume 3. Wiley New York, 2006. Cité page 83.
- Benjamin Stephens : *Push recovery control for force-controlled humanoid robots*. Thèse de doctorat, Carnegie Mellon University, 2011. Cité page 63.
- Freek Stulp, Jonas Buchli, Evangelos Theodorou et Stefan Schaal : Reinforcement learning of full-body humanoid motor skills. In *10th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids'2010)*, pages 405–410. IEEE, 2010. Cité page 25.
- YX Su, Dong Sun et BY Duan : Design of an enhanced nonlinear pid controller. *Mechatronics*, 15(8):1005–1024, 2005. Cité page 66.
- Tomomichi Sugihara et Yoshihiko Nakamura : Whole-body cooperative balancing of humanoid robot using cog jacobian. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'2002)*, volume 3, pages 2575–2580. IEEE, 2002. Cité page 63.
- Wael Suleiman, Eiichi Yoshida, Fumio Kanehiro, J-P Laumond et André Monin : On human motion imitation by humanoid robot. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'2008)*, pages 2697–2704. IEEE, 2008. Cité page 27.
- Zhe Tang et Meng Joo Er : Humanoid 3D Gait Generation Based on Inverted Pendulum Model. In *Proceedings of the IEEE 22nd International Symposium on Intelligent Control (ISIC'07)*, pages 339–344, Singapore, 2007. Cité page 62.
- Takashi Uchiyama, Toshihiko Morita et Naoyuki Sawasaki : Development of personal robot. In Makoto Kaneko et Yoshihiko Nakamura, éditeurs : *Robotics Research*, volume 66 de *Springer Tracts in Advanced Robotics*, pages 319–336. Springer Berlin Heidelberg, 2011. Cité page 102.
- Aaron Voisine : ezxml - xml parsing c library, 2013. URL <http://ezxml.sourceforge.net/>. Cité page 86.
- Miomir Vukobratović et Branislav Borovac : Zero-moment point-thirty five years of its life. *International Journal of Humanoid Robotics*, 1(1):157–173, 2004. Cité page 18.
- Yangming Xu, John M. Hollerbach et Donghai Ma : A nonlinear pd controller for force and contact transient control. *Control Systems, IEEE*, 15(1):15–21, 1995. Cité page 66.

- Jin'ichi Yamaguchi, Eiji Soga, Sadatoshi Inoue et Atsuo Takanishi : Development of a bipedal humanoid robot-control method of whole body cooperative dynamic biped walking. *In IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'1999)*, volume 1, pages 368–374. IEEE, 1999. Cité page [27](#).
- Katsu Yamane, Stuart O Anderson et Jessica K Hodgins : Controlling humanoid robots with human motion data : Experimental validation. *In 10th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids'2010)*, pages 504–510. IEEE, 2010. Cité page [25](#).
- Katsu Yamane et Jessica Hodgins : Simultaneous tracking and balancing of humanoid robots for imitating human motion capture data. *In IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'2009)*, pages 2510–2517. IEEE, 2009. Cité page [25](#).
- Seung-Joon Yi, Byoung-Tak Zhang, Dennis Hong et Daniel D Lee : Learning full body push recovery control for small humanoid robots. *In IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'2011)*, pages 2047–2052. IEEE, 2011. Cité page [63](#).
- Eiichi Yoshida, Mathieu Poirier, J-P Laumond, Oussama Kanoun, Florent Lamiroux, Rachid Alami et Kazuhito Yokoi : Whole-body motion planning for pivoting based manipulation by humanoids. *In IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'2008)*, pages 3181–3186. IEEE, 2008. Cité page [27](#).